Hydrostatische Koppelgetriebe
Analyse, optimale Auslegung, Gestaltung, Vergleiche
Band I

Doktorarbeit

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der Abteilung für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Heinrich Benthake

geboren zu Düsseldorf

Bochum, Januar 1976

Hydrostatische Koppelgetriebe
Analyse, optimale Auslegung, Gestaltung, Vergleiche
Band I

Doktorarbeit

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der Abteilung für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Heinrich Benthake
geboren zu Düsseldorf

Bochum, Januar 1976

Doktorarbeit eingereicht am: 12. 1. 1976
Tag der mündlichen Prüfung: 13. 2. 1976
Referent: o. Prof. Dr.-Ing. F. Jarchow
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Kanarachos

UNIV.

Vorwort

Bereits im Jahre 1968 erhielt ich als Entwicklungsingenieur im Unternehmen Rheinstahl Hüttenwerke AG, Werk Friedrich Wilhelms-Hütte in Mülheim-Ruhr die Aufgabe, hydrostatische Koppelgetriebe systematisch zu untersuchen und mit hydrostatischen Standgetrieben zu vergleichen. Sehr bald stellte sich die Notwendigkeit umfangreicher theoretischer Untersuchungen heraus. Vordringliche Tagesaufgaben verzögerten jedoch diese Arbeiten. Erst als mein zuständiger Abteilungsdirektor, Herr Dr.-Ing. F. Jarchow, im Jahre 197o einen Ruf als ordentlicher Professor auf den Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik im Institut für Konstruktionstechnik der Ruhr-Universität Bochum annahm, hatte ich die Möglichkeit, außerhalb meiner Dienstzeit die Arbeit als Dissertation voranzutreiben und zu beenden.

Für die zahlreichen Anregungen und die ständige Förderung möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Jarchow meinen besonderen Dank aussprechen. Ferner gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Rainer Sturmath, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik, für die Unterstützung bei der Ausarbeitung. Aber auch den Unternehmen Rheinstahl AG Transporttechnik, Kassel und Westdeutsche Getriebewerke GmbH, Herne, sei an dieser Stelle für ihr stetes Interesse und Entgegenkommen gedankt.

Bochum im Dezember 1975

Band I

Inhalt

	Seite
1. Einführung	4
2. Bezeichnungen	5
3. Grundlagen und Getriebearten	6
4. Kennfeld von Arbeitsmaschinen	12
5. Beurteilungskriterien	15
6. Hydrostatisches Koppelgetriebe A	19
6.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen	19
6.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen	29
6.3. Optimale Auslegungsverhältnisse	33
6.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$	35
6.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$	42
6.4. Zusammenfassung	48
7. Hydrostatisches Koppelgetriebe B	54
7.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen	54
7.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen	65
7.3. Optimale Auslegungsverhältnisse	66
7.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$	67
7.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$	74
7.4. Zusammenfassung	81
8. Hydrostatisches Koppelgetriebe C	86
8.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen	87
8.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen	91
8.3. Optimale Auslegungsverhältnisse	94
8.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$	95
8.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$	1o4
8.4. Zusammenfassung	1o4

Seite

9. Vergleiche 1o9

1o. Auslegungsbeispiel für hydrostatisches Koppelgetriebe A 111

11. Beispiel für hydrostatisches Koppelgetriebe C 112

11.1. Auslegung und Gestaltung 112

11.2. Vergleiche mit hydrostatischem Standgetriebe 115

12. Schrifttum 118

1. Einführung

In vielen Fällen haben Kraft- und Arbeitsmaschinen unterschiedliche Kennlinien. Zur Anpassung sind dann Getriebe notwendig. Häufig erfordert der Arbeitsvorgang eine stufenlos einstellbare Übersetzung. Bei größeren zu übertragenden Leistungen bieten sich hydraulische Getriebe an. Im allgemeinen weisen sie aber im Vergleich zu mechanisch stufenlosen Getrieben schlechtere Wirkungsgrade auf. Eine Kombination von hydraulischen und mechanischen Getrieben, d.h. Koppelgetriebe führen wieder zu besseren Wirkungsgraden und oft auch zu kleineren Baugrößen. Beim Übergang auf Koppelgetriebe erreicht man in der Regel mehr bei hydrostatischen als bei hydrodynamischen Getrieben. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Analyse, Optimierung, Gestaltung und dem Vergleich bestimmter hydrostatischer Koppelgetriebe.

Die Arbeit besteht aus zwei Bänden, von denen der zweite Diagramme als Arbeitsunterlagen für den Konstrukteur enthält.

2. Bezeichnungen

Die hier nicht aufgeführten Bezeichnungen und Indizes sind im Text bzw. in den Bildunterschriften erläutert.

i	Übersetzung
P	Leistung
T	Drehmoment
V	Verdrängungsvolumen
α	Vergleichszahl für Verdrängungsvolumen
κ	Auslegungsverhältnis für Hauptgetriebe
λ	bezogenes absolutes Drehmoment
ν	Arbeitsmaschinenexponent
φ	Stellverhältnis
ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a, b, e, f, e', f', l, r, q	Wellen
best	Bestwert
g	Grenzwert
h	hydrostatisch
k	kuppeln
m	mechanisch
max	maximal
min	minimal
w	wälzen
+	größte absolute Winkelgeschwindigkeit der Arbeitsmaschine
Δ	kleinste absolute Winkelgeschwindigkeit der Arbeitsmaschine

3. Grundlagen und Getriebearten

Nach [1] können hydrostatische Koppelgetriebe im Vergleich zu hydrostatischen Stand- und Umlaufgetrieben kleinere Verdrängungsvolumen und bessere Wirkungsgrade aufweisen.

Bild 1 zeigt ein stufenlos einstellbares hydrostatisches Standgetriebe in vertrauter Darstellung mit Symbolen nach DIN 24 3oo bzw.Cetop-RP3. Die unmittelbar oder über das Fundament miteinander verbundenen Gehäuse der Verdrängermaschinen bilden den Steg des Getriebes. Für dieses Getriebe gibt Bild 2 eine vereinfachte symbolische Darstellung an. Striche markieren die Wellen a und b. Der in den Kreis hineingeführte Strich stellt den Steg dar. Hier ist er mit dem Getriebegehäuse O identisch. Der Pfeil weist auf die stufenlose Einstellbarkeit der Übersetzung hin.

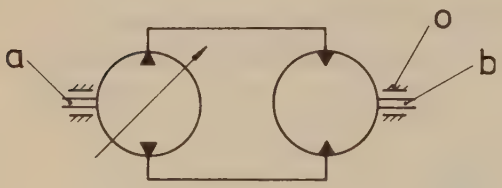

Bild 1

Hydrostatisches Standgetriebe in symbolischer Darstellung nach DIN 243oo bzw. Cetop-RP3

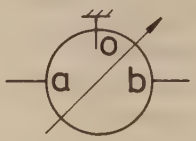

Bild 2

Hydrostatisches Standgetriebe in vereinfachter symbolischer Darstellung

Die Bilder 3 und 4 geben eine analoge Darstellung für ein Räderstandgetriebe mit den Wellen e und f.

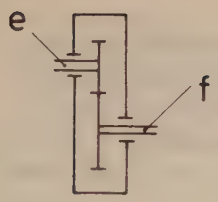

Bild 3

Räderstandgetriebe schematisch

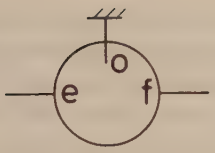

Bild 4

Räderstandgetriebe symbolisch

Bild 5 stellt schematisch ein dreiwelliges Räderumlaufgetriebe mit den Wellen l, r, q und dem Gehäuse O dar. Die Welle q ist die Stegwelle. Das Getriebe hat zwei kinematische Freiheitsgrade. Sein Symbol vermittelt Bild 6.

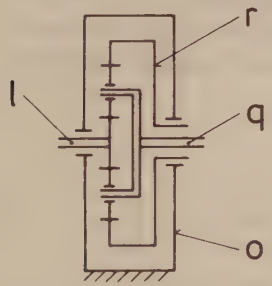

Bild 5

Räderumlaufgetriebe dreiwellig, schematisch

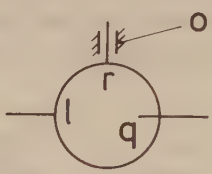

Bild 6

Räderumlaufgetriebe dreiwellig, symbolisch

Die hier behandelten Koppelgetriebe bestehen aus einem dreiwelligen Räderumlaufgetriebe mit den Wellen l, r, q als Hauptgetriebe und einem hydrostatischen Standgetriebe mit den Wellen a, b als Nebengetriebe. Nach den Bildern 7 bis 9 koppelt ein zweiwelliges Rädergetriebe mit den Wellen g, k

die Wellen a und r. Ein zweiwelliges Rädergetriebe mit den Wellen e und f verbindet beim Koppelgetriebe A nach Bild 7 die Wellen b und q, beim Koppelgetriebe B nach Bild 8 die Wellen b und 1 und beim umschaltbaren Koppelgetriebe C nach Bild 9 über die Schaltkupplung A die Wellen b und q oder über dei Schaltkupplung B die Wellen b und 1.

Die Wellen 1 oder q haben Verzweigungsstellen für Drehmomente und Leistungen. Deshalb benennt man diese Wellen außerhalb der Verzweigungsstellen mit 1 bzw. 2. 1 sei die An-, 2 die Abtriebswelle und O das Gehäuse der verschiedenen Koppelgetriebe.

In den Bildern 7 bis 9 sind die Rädergetriebe jeweils ohne Angabe der Stegwelle dargestellt, da dies für die Ermittlung der notwendigen Übersetzungen bei optimaler Auslegung bedeutungslos ist. Erst nach Kenntnis der geforderten Übersetzungen wird sich der Konstrukteur für den Aufbau und die Lage der Stegwellen der einzelnen Getriebe entscheiden, die zu einem Koppelgetriebe gehören.

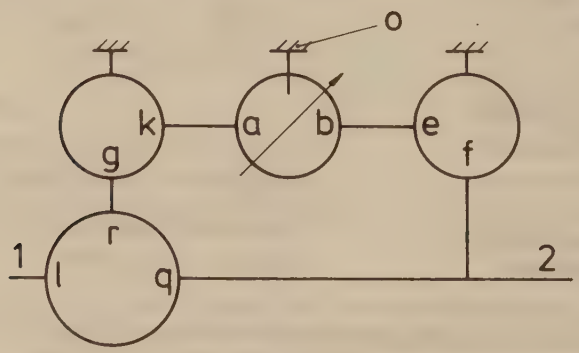

Bild 7 Hydrostatisches Koppelgetriebe A symbolisch

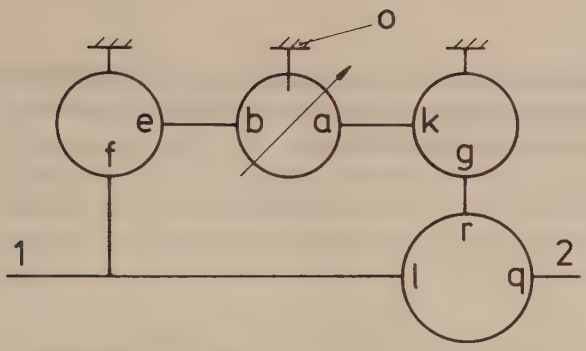

Bild 8 Hydrostatisches Koppelgetriebe B symbolisch

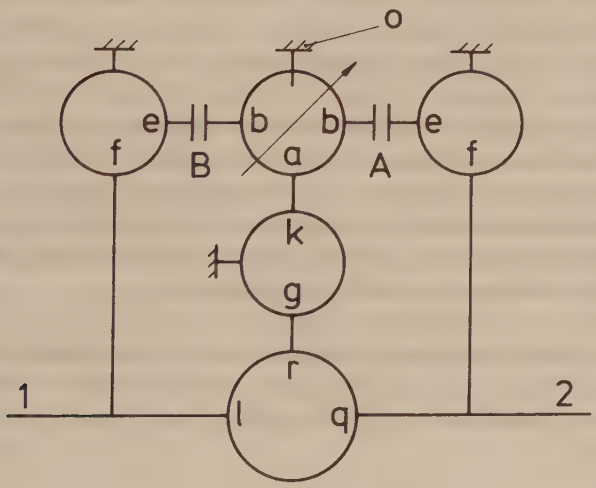

Bild 9 Hydrostatisches Koppelgetriebe C symbolisch

Bei den vorstellten Koppelgetrieben heißt die Leistung im Nebengetriebe hydrostatische Leistung P_h und im Hauptgetriebe mechanische Leistung P_m. Im Hauptgetriebe gibt es wieder zwei Leistungsflüsse, und zwar durch die Wälzleistung P_w

und die verlustlose Kupplungsleistung P_k. Unter Vernachlässigung der Verlustleistungen gelten mit der positiv definierten Antriebsleistung P_1 die Beziehungen

$$P_1 = P_h + P_m \tag{1}$$

$$P_m = P_w + P_k \tag{2}$$

Leistungen mit negativen Vorzeichen fließen der Antriebsleistung entgegen und kreisen als Blindleistung. Bei negativer hydrostatischer Leistung strömt diese zusätzlich zur Antriebsleistung als mechanische Leistung durch das Hauptgetriebe und bei negativer mechanischer Leistung fließt diese zusätzlich zur Antriebsleistung als hydrostatische Leistung durch das Nebengetriebe. Abhängig von der Richtung der Leistungsflüsse kann es beim Hauptgetriebe zwei oder eine Antriebs- bzw. eine oder zwei Abtriebswellen geben. Für das Räderumlaufgetriebe lassen sich die Wirkungsgrade mit dreiwelligem Bezug und damit die Verlustleistungen nach [2] berechnen. Für die Bestimmung der Verlustleistungen im hydrostatischen Standgetriebe sei auf Firmenschriften, hier auf [3] verwiesen.

In dieser Arbeit geht man bei der Auslegung der Koppelgetriebe davon aus, daß die Verlustleistungen vernachlässigt werden und die Arbeitsmaschine im Stellbereich ihre Drehrichtung beibehält.

Den Einfluß der Drehrichtungsumkehr und Maßnahmen dafür behandelt [1]. Mit einem zusätzlichen Wendegetriebe läßt sich volle Reversierbarkeit ohne Einfluß auf die Auslegung des Koppelgetriebes immer erreichen.

Das Gehäuse O und die Wellen 1, r, q von Zylinderräder-Umlaufgetrieben lassen sich durch vier zueinander parallel bewegte Ebenen O, 1, r, q ersetzen. Nach den Gesetzen der Kinematik müssen bei Betrachtung von jeweils drei Ebenen die Summen der Winkelgeschwindigkeiten bei zyklischer Vertauschung der Indizes entsprechend Bild 1o gleich Null sein.

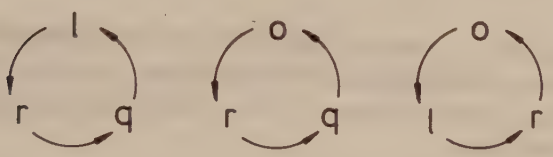

Bild 1o Zyklische Vertauschung von Indizes

Berücksichtigt man, daß bei der Betrachtung jeweils zweier Ebenen ein Vertauschen von Indizes einem Beobachterwechsel gleichkommt und damit einen Wechsel des Vorzeichens erfordert sowie ferner, daß innerhalb der Verzweigungsstellen bei der Betrachtung der drei Ebenen 1, r, q das Verhältnis von zwei Winkelgeschwindigkeiten die Übersetzung i ist, wenn gleiche Indizes untereinanderstehen und somit der Betrachter von einer Ebene aus die beiden anderen beobachtet, folgt

$$\omega_{1r} + \omega_{rq} + \omega_{q1} = 0 \qquad (3)$$

$$\omega_{or} + \omega_{rq} + \omega_{qo} = 0 \qquad (4)$$

$$\omega_{o1} + \omega_{1r} + \omega_{ro} = 0 \qquad (5)$$

Mit Gl. (3) wird

$$\frac{\omega_{1r}}{\omega_{qr}} = 1 - \frac{\omega_{1q}}{\omega_{rq}} = i_{1r-qr} = 1 - i_{1q-rq} = i_{1q} = 1 - i_{1r} \qquad (6)$$

Durch Erweitern von Gl. (4) mit ω_{1r} und Gl. (5) mit ω_{rq} sowie durch Subtraktion der Gl. (4) und (5) erhält man

$$\omega_{ro} = \frac{\omega_{1o} - \omega_{qo}\frac{\omega_{1r}}{\omega_{qr}}}{1 - \frac{\omega_{1r}}{\omega_{qr}}} = \omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2\, i_{1q}}{i - i_{1q}} \qquad (7)$$

Die Übersetzung i_{1q} beeinflußt die Größe der Verdrängungsvolumen des hydrostatischen Standgetriebes. Für eine bestimmte Größe von i_{1q} kann man nach [2] ein geeignetes Umlaufgetriebe bestimmen.

4. Kennfeld von Arbeitsmaschinen

Der Verlauf des Drehmomentes T_2 abhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω_2 sowie die größte absolute Winkelgeschwindigkeit $|\omega_2|_+$ und die kleinste absolute Winkelgeschwindigkeit $|\omega_2|_\Delta$ kennzeichnen hier eine Arbeitsmaschine.

Die Kraftmaschine muß mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_1 = \omega_{1max}$ die maximale benötigte Leistung zur Verfügung stellen können. Unter Vernachlässigung der Verlustleistungen gilt für sie die Beziehung

$$P_{1+} = -T_{2+}\,\omega_{2+} = T_{1+}\omega_{1max} \qquad (8)$$

Mit

$$i_{12+} = \frac{\omega_{1max}}{\omega_{2+}} \qquad (9)$$

und

$$i_{12\Delta} = \frac{\omega_{1max}}{\omega_{2\Delta}} \qquad (10)$$

folgt für das Stellverhältnis

$$\nu = \frac{i_{12\Delta}}{i_{12+}} \qquad (11)$$

wobei die Grenzen des Stellbereiches

$$|i_{12\Delta}| > |i_{12+}| \qquad (12)$$

Mit dem Arbeitsmaschinenexponenten ν und Bezug auf die Werte bei ω_{2+} erhält man die Beziehung für das Kennfeld der Arbeitsmaschine nach Bild 11

$$\frac{T_2}{T_{2+}} = \left[\frac{\omega_2}{\omega_{2+}}\right]^{\nu} = \left[\frac{\omega_2}{\omega_{1max}} \cdot \frac{\omega_{1max}}{\omega_{2+}}\right]^{\nu} = \left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{\nu} \qquad (13)$$

ν liegt zwischen -1 und 2. So hat eine Arbeitsmaschine mit $\nu = -1$ konstante Leistung, $\nu = 0$ konstantes Drehmoment, $\nu = 1$ linear mit ω_2 und $\nu = 2$ quadratisch mit ω_2 wachsendes Drehmoment. Beispiele dafür seien eine Plandrehmaschine mit konstanter Schnittgeschwindigkeit, ein Hubwerk, ein Rührwerk und eine Turbomaschine.

Oft bedingen die Gegebenheiten einen lastfreien Anlauf der Kraftmaschinen. Wenn keine entsprechenden Trennkupplungen vorgesehen sind, müssen die stufenlosen Getriebe das Hochfahren der Arbeitsmaschinen aus dem Stillstand heraus ermöglichen.

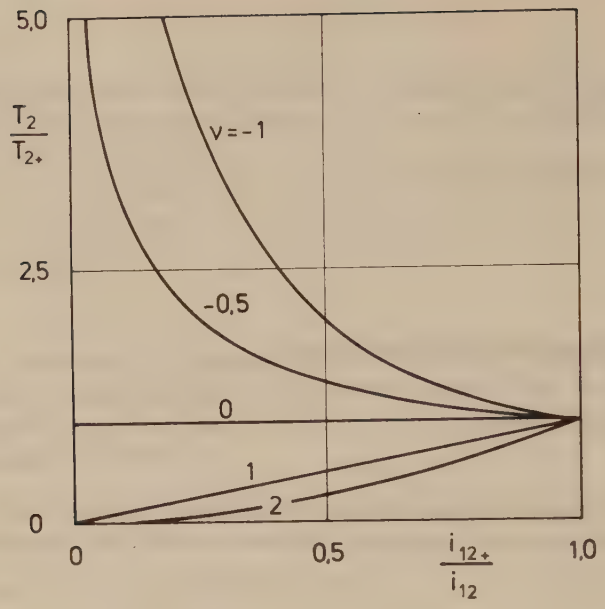

Bild 11 Kennfeld von Arbeitsmaschinen mit durch den Arbeitsmaschinenexponenten ν gekennzeichneten Kennlinien verschiedener Arbeitsmaschinen

Arbeitsmaschinen mit $\nu < 0$ erfordern dann eine Druckbegrenzung im hydrostatischen Kreislauf, so daß bis $\omega_{2\Delta}$ das Drehmoment T_2 auf $T_{2\Delta}$ begrenzt wird. Man hat daher für $\nu < 0$ die Stellbereiche ohne und mit Drehmomentbegrenzung zu unterscheiden.

Bei Arbeitsmaschinen mit $\nu \geq 0$ braucht man nicht so vorzugehen. Hier werden dann beim Anfahren aus dem Stillstand heraus $\omega_{2\Delta} = 0$ und $\varphi = \infty$.

Die die Auslegung der Getriebe beeinflussenden Größen der Arbeitsmaschinen sind also das Stellverhältnis φ, der Arbeitsmaschinenexponent ν und bei $\nu < 0$ die Art des Stellbereiches.

5. Beurteilungskriterien

Bei konstanter Druckdifferenz im hydrostatischen Kreislauf und unter Vernachlässigung der Verluste gilt für das maximale absolute Verdrängungsvolumen einer Verdrängermaschine

$$|V|_{max} \sim |T_{max}| \tag{14}$$

Die Summe der maximalen absoluten Drehmomente $|T_a|_{max} + |T_b|_{max}$ sind ein Maß für die Baugrößen der verschiedenen Getriebe.

Für ein hydrostatisches Standgetriebe nach Bild 2 folgt

$$|T_a|_{max} = \left|\frac{T_2}{i_{12}}\right|_{max} \tag{15}$$

mit Gl. (13)

$$|T_a|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{\nu+1}_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \tag{16}$$

$$|T_b|_{max} = |T_2|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \left[\frac{i_{12+}^{\nu+1}}{i_{12}^{\nu}}\right]_{max} =$$

$$= \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{\nu}_{max} \tag{17}$$

und für die bezogenen maximalen absoluten Drehmomente

$$\lambda_a = \frac{|T_a|_{max}}{\frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}}} = 1 \tag{18}$$

$$\lambda_b = \frac{|T_b|_{max}}{\frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|}\frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}}} = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{\nu}_{max} \tag{19}$$

Für die maximalen absoluten Winkelgeschwindigkeiten der Verdrängermaschinen sind die zulässigen Werte einzusetzen.

Mit Rücksicht auf gleiche Gleitgeschwindigkeiten in den Verdrängermaschinen wird bei möglicher Aufteilung der notwendigen maximalen absoluten Verdrängungsvolumen auf gleich große Verdrängermaschinen

$$\frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} = 1 \tag{20}$$

$$\lambda_{b1} = \left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{\nu}_{max} \tag{21}$$

und bei unterschiedlichen maximalen absoluten Verdrängungsvolumen

$$\frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} = \sqrt[3]{\frac{|T_b|_{max}}{|T_a|_{max}}} = \sqrt[3]{\frac{\lambda_b}{\lambda_a}} \tag{22}$$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\left[\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right]^{3\nu}_{max}} \tag{23}$$

Mit

$$\lambda_1 = \lambda_a + \lambda_{b1} \tag{24}$$

$$\lambda_2 = \lambda_a + \lambda_{b2} \tag{25}$$

gilt für $\nu \leq 0$

$$\lambda_1 = 1 + \frac{1}{\varphi^{\nu}} \tag{26}$$

$$\lambda_2 = 1 + \frac{1}{\sqrt{\varphi^{3\nu}}} \tag{27}$$

und für $\nu \geq 0$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2 \tag{28}$$

Bei hydrostatischen Koppelgetrieben nach den Bildern 7 bis 9 sind die Größen

$$\lambda = \frac{|T|_{max}}{\frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|}\,\frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}}} \tag{29}$$

noch eine Funktion des Auslegungsverhältnisses $\kappa = i_{1q}/i_{12+}$ für das Hauptgetriebe, wobei $1 < \kappa < \varphi$.

Für

$$\kappa = \kappa_{1best} \tag{30}$$

mit

$$\lambda = \lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{blbest} \tag{31}$$

oder für

$$\kappa = \kappa_{2best} \tag{32}$$

mit

$$\lambda = \lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} \qquad (33)$$

sind die Koppelgetriebe optimal ausgelegt. Sie erhalten ein Minimum der Summe der maximalen absoluten Verdrängungsvolumen und im allgemeinen auch einen relativ guten Verlauf der Wirkungsgrade.

Zur Gegenüberstellung bezieht man die λ-Größen der hydrostatischen Koppelgetriebe A, B, C auf die eines hydrostatischen Standgetriebes und bekommt so die Vergleichszahlen α_1 und α_2.

Zur weiteren Beurteilung dienen die sich mit $\kappa = \kappa_{1best}$ und $\kappa = \kappa_{2best}$ ergebenden maximalen absoluten Leistungsverhältnisse $|P_h/P_{1+}|_{1max}$ und $|P_h/P_{1+}|_{2max}$ sowie die sich für $\kappa = \kappa_h$ einstellenden Minima der maximalen absoluten Leistungsverhältnisse $\min |P_h/P_{1+}|_{max}$ mit den zugehörigen Größen λ_{1h}, λ_{2h} und α_{1h}, α_{2h}.

Somit ist ein Vergleich von Auslegungen auf λ_{min} und auf $\min |P_h/P_{1+}|_{max}$ möglich.

Für die absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen wird das Vorzeichen der hydrostatischen Leistungen angegeben, um ihre Flußrichtung zu kennzeichnen.

Wenn sich Größen λ_{min} unabhängig von κ ergeben, dann empfiehlt sich die Wahl von κ_h oder eines Wertes nahe bei κ_h, um so zu einem möglichst kleinen hydrostatischen Leistungsfluß zu kommen.

6. Hydrostatisches Koppelgetriebe A

6.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen

Nach Bild 7 gilt

$$|T_a| = |T_1| \; |i_{1r}| \; |i_{gk}| \tag{34}$$

und unter Berücksichtigung von Gl. (7) mit

$$|i_{gk}| = \frac{|\omega_r|_{max}}{|\omega_a|_{max}} = \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \frac{|1 - \frac{i_{1q}}{i_{12}}|_{max}}{|1 - i_{1q}|} \tag{35}$$

folgt mit Gl. (6)

$$|T_a| = |T_1| \; \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \; |1 - \frac{i_{1q}}{i_{12}}|_{max} \tag{36}$$

und mit

$$|T_1|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \tag{37}$$

$$|T_a|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \; \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \; |1 - \frac{i_{1q}}{i_{12}}|_{max} \tag{38}$$

Mit Gl. (29) wird

$$\lambda_a = |1 - \kappa \frac{i_{12+}}{i_{12}}|_{max} \tag{39}$$

Im Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung liegt nach Bild 12 λ_a entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12\Delta} = 1/\varrho$.

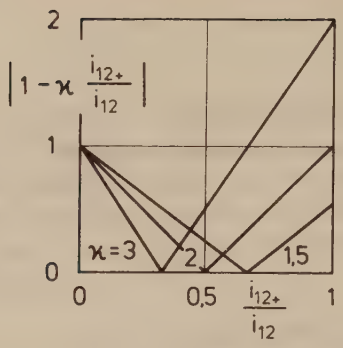

Bild 12 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von λ_a für das Koppelgetriebe A

Die Entscheidungshilfe erhält man aus dem Ansatz

$$|1 - \kappa_{g1}| = |1 - \frac{\kappa_{g1}}{\varphi}| \tag{4o}$$

mit

$$\kappa_{g1} = \frac{2\varphi}{\varphi + 1} \tag{41}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g1}:\quad \lambda_a = 1 - \frac{\kappa}{\varphi} \tag{42}$$

$$\nu \leq 0\ ;\kappa \geq \kappa_{g1}:\quad \lambda_a = \kappa - 1 \tag{43}$$

Im Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung liegt λ_a entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12} = 0$. Somit folgt

$$|1 - \kappa_{g1}| = 1 \tag{44}$$

mit

$$\kappa_{gl} = 2 \tag{45}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq 2 \qquad \lambda_a = 1 \tag{46}$$

Für $\kappa \geq 2$ bleibt hier Gl. (43) gültig. Das Anfahren der Arbeitsmaschine aus dem Stillstand mit dem Koppelgetriebe A wirkt sich also nur für $\kappa < 2$ auf das maximale Drehmoment der Verdrängermaschine mit der Welle a aus.

Nach Bild 7 gilt ferner

$$T_b\, i_{ef} + T_1\, i_{1q} + T_2 = 0 \tag{47}$$

$$T_b = - \frac{T_1\, i_{1q} + T_2}{i_{ef}} \tag{48}$$

Mit Gl. (13) und

$$T_1 = - \frac{T_2}{i_{12}} \tag{49}$$

$$i_{ef} = \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_2|_{max}} = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_1|_{max}}\, |i_{12+}|\, \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \tag{5o}$$

wird

$$T_b = \frac{|T_{2+}|\ |(\frac{i_{12+}}{i_{12}})^{\nu}\ (1 - \kappa\, \frac{i_{12+}}{i_{12}})|}{\frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_1|_{max}}\, |i_{12+}|\, \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_a|_{max}}} \tag{51}$$

und mit Gl. (29)

$$\lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \cdot \left| \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \kappa \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} \right|_{max} \qquad (52)$$

mit $\frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}}$ nach Gl. (2o) für λ_{b1} und nach Gl. (22) für λ_{b2}

Für $\nu \leq 0$ kann $\left| \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \kappa \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} \right|_{max}$ in Gl. (52) je nach der Größe von κ bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$ liegen. Bild 13 macht dies am Beispiel $\nu = -1$ deutlich.

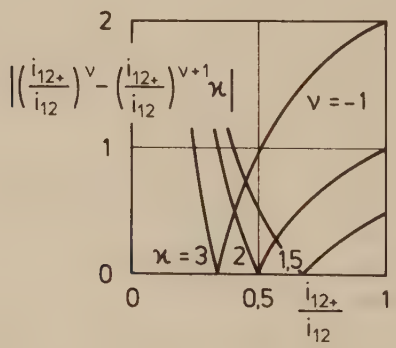

Bild 13 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von λ_b bei Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$ für das Koppelgetriebe A

Die Entscheidungshilfe bringt der Ansatz

$$|1 - \kappa_{g2}| = \left| \frac{1}{\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}} \kappa_{g2} \right| \tag{53}$$

mit

$$\kappa_{g2} = \frac{\varphi + \varphi^{\nu+1}}{1 + \varphi^{\nu+1}} \tag{54}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}: \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right) \tag{55}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}: \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} (\kappa - 1) \tag{56}$$

Für $\nu > 0$ muß man das vorhandene Maximum aus

$$\frac{d}{d \frac{i_{12+}}{i_{12}}} \left| \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \kappa \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} \right| = 0 \tag{57}$$

an der Stelle

$$\frac{i_{12+}}{i_{12}} = \frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa} \tag{58}$$

mitberücksichtigen.

Bild 14 zeigt dies an einem Beispiel mit $\nu = 1$

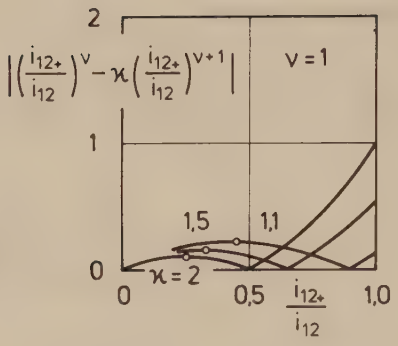

Bild 14 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von λ_b bei Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$ für das Koppelgetriebe A

Die Stelle nach Gl. (58) kann aber nur in Betracht kommen, wenn

$$\frac{1}{y} \leq \frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa} \tag{59}$$

Daraus folgt die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g3} = \frac{\nu}{\nu+1}\, y \tag{60}$$

Für $\kappa \geq \kappa_{g3}$ bleiben die Gl. (55) und (56) gültig, während für $\kappa \leq \kappa_{g3}$ der Wert

$$\left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \kappa\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right|_{max}$$

entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder an der Stelle nach Gl. (58) liegt. Die Bedingung

$$\left| \left[\frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa_{g4}} \right]^{\nu} - \kappa_{g4} \left[\frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa_{g4}} \right]^{\nu+1} \right| = \left| 1 - \kappa_{g4} \right| \qquad (61)$$

bringt die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g4}{}^{\nu+1} - \kappa_{g4}{}^{\nu} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \qquad (62)$$

$$\nu > 0; \quad \begin{matrix} \kappa \leq \kappa_{g3} \\ \kappa \leq \kappa_{g4} \end{matrix} : \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu}} \qquad (63)$$

Für $\kappa \geq \kappa_{g4}$ trifft Gl. (56) zu. Die Kurve nach Gl. (62) ist im Bild 15 aufgetragen.

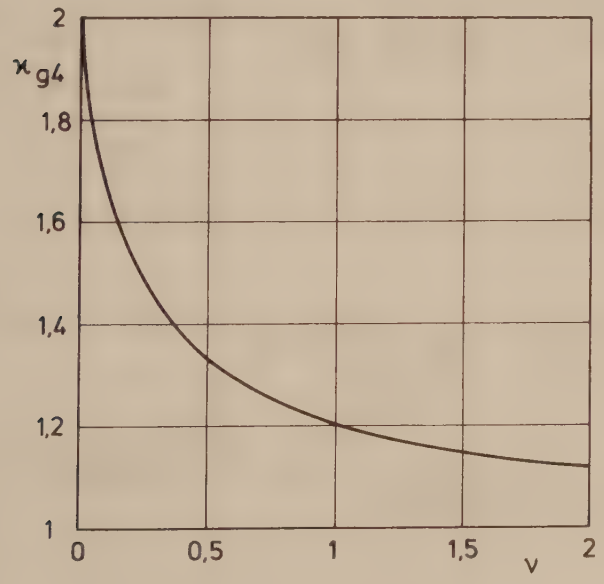

Bild 15 Grenzauslegungsverhältnis κ_{g4} abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν

Mit den Gl. (2o), (55), (56) und (63) folgen bedingungsgemäß

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2} \\ \qquad \kappa \geq \kappa_{g3} \end{array}\right\} \quad \lambda_{b1} = \frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right) \tag{64}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu < 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \geq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \quad \lambda_{b1} = \kappa - 1 \tag{65}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \leq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \quad \lambda_{b1} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu}} \tag{66}$$

und mit den Gl. (22), (42), (43), (46), (55), (56) und (63) erhält man bedingungsgemäß

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{\varphi - \kappa}{\varphi} \sqrt{\frac{1}{\varphi^3 \nu}} \tag{67}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{1}{\kappa - 1} \left[\frac{1}{\varphi \nu} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi} \right) \right]^3} \tag{68}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq 2$

Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\left[\frac{1}{\varphi \nu} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi} \right) \right]^3} \tag{69}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g4}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa}\ (\kappa - 1)^3} \tag{70}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g4}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \kappa - 1 \tag{71}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq 2$

Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \sqrt{(\kappa - 1)^3} \tag{72}$$

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g4}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{\varphi^2}{\varphi - \kappa}\left[\frac{\nu^\nu}{(\nu+1)^{\nu+1}}\frac{1}{\kappa^\nu}\right]^3} \tag{73}$$

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g4}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{1}{\kappa - 1}\left[\frac{\nu^\nu}{(\nu+1)^{\nu+1}}\frac{1}{\kappa^\nu}\right]^3} \tag{74}$$

6.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen

Nach [4] Gl. (67a) gilt für das Leistungsverhältnis

$$\frac{P_h}{P_1} = 1 - \frac{i_{1q}}{i_{12}} = 1 - \kappa\,\frac{i_{12+}}{i_{12}} \tag{75}$$

Ferner ist mit Gl. (13)

$$P_1 = P_{1+}\,\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} \tag{76}$$

und somit

$$\left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} - \kappa\,\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+2}\right|_{max} \tag{77}$$

Mit $i_{12+}/i_{12} = 1$ und $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$ folgt aus Gl. (77) mit dem Ansatz

$$|1 - \kappa_{g5}| = \left|\left(\frac{1}{\varphi}\right)^{\nu+1} - K_{g5}\left(\frac{1}{\varphi}\right)^{\nu+2}\right| \tag{78}$$

die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g5} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+2}}{1+\varphi^{\nu+2}} \tag{79}$$

Für $\nu > -1$ muß man das vorhandene Maximum aus

$$\frac{d}{d\,\frac{i_{12+}}{i_{12}}}\left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} - \kappa\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+2}\right| = 0 \tag{8o}$$

an der Stelle

$$\frac{i_{12+}}{i_{12}} = \frac{\nu+1}{(\nu+2)\ \kappa} \tag{81}$$

mitberücksichtigen.

Die Stelle nach Gl. (81) kann aber nur in Betracht kommen, wenn

$$\frac{1}{\varphi} \leq \frac{\nu+1}{(\nu+2)\ \kappa} \tag{82}$$

Daraus folgt die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g6} = \frac{\nu+1}{\nu+2}\varphi \tag{83}$$

Für $\kappa \geq \kappa_{g6}$ liegt $|P_h/P_{1+}|_{max}$ entweder für $\kappa \geq \kappa_{g5}$ an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder für $\kappa \leq \kappa_{g5}$ an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$, während für $\kappa \leq \kappa_{g6}$ $|P_h/P_{1+}|_{max}$ entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei i_{12+}/i_{12} nach Gl. (81) auftritt. Für $\kappa \leq \kappa_{g6}$ bringt die Bedingung

$$|1 - \kappa_{g7}| = \left|\left[\frac{\nu+1}{(\nu+2)\,\kappa_{g7}}\right]^{\nu+1} \frac{1}{\nu+2}\right| \tag{84}$$

die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g7}^{\nu+2} - \kappa_{g7}^{\nu+1} - \frac{(\nu+1)^{\nu+1}}{(\nu+2)^{\nu+2}} = 0 \tag{85}$$

deren Verlauf im Bild 16 dargestellt ist.

Für die maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen bei optimalen Auslegungsverhältnissen κ_{best} gelten bedingungsgemäß folgende Beziehungen, wobei mit sig das Vorzeichen des hydrostatischen Leistungsflusses angegeben ist.

$\kappa_{best} \geq \kappa_{g5}$

$\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$

oder

$\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$

$\kappa_{best} \geq \kappa_{g7}$

$$\left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \kappa_{best} - 1 \qquad \text{mit sig -} \tag{85}$$

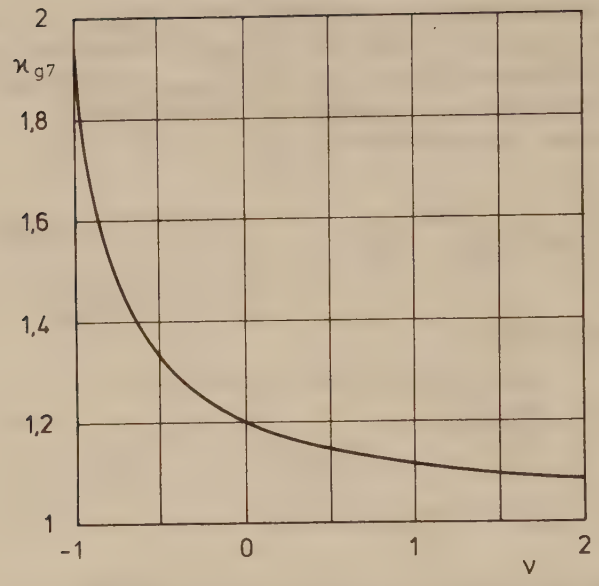

Bild 16 Grenzauslegungsverhältnis κ_{g7} abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν

$\kappa_{best} \leq \kappa_{g5}$

$\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$

$$\left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \left(\frac{1}{\varphi}\right)^{\nu+1} \left(1 - \frac{\kappa_{best}}{\varphi}\right) \qquad (86)$$

mit sig +

$\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$

$\kappa_{best} \leq \kappa_{g7}$

$$\left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \left[\frac{\nu+1}{(\nu+2)\kappa_{best}}\right]^{\nu+1} \frac{1}{\nu+2} \qquad (87)$$

mit sig +

6.3. Optimale Auslegungsverhältnisse

Das Minimum der maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen erhält man an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ mit

$$\min \left| \frac{P_h}{P_{1+}} \right|_{\max} = \kappa_h - 1 \tag{88}$$

wenn entweder Gl. (78) oder aber Gl. (84) erfüllt ist und somit

$$\kappa_h = \kappa_{g5} \geq \kappa_{g6} \tag{89}$$

oder

$$\kappa_h = \kappa_{g7} \leq \kappa_{g6} \tag{90}$$

Die hydrostatische Leistung hat an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ ein negatives und an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$ bzw. i_{12+}/i_{12} nach Gl. (81) ein positives Vorzeichen.

Den qualitativen Verlauf der Funktionen $\lambda = \lambda_a + \lambda_b$ zeigen die Bilder 17 bis 19.

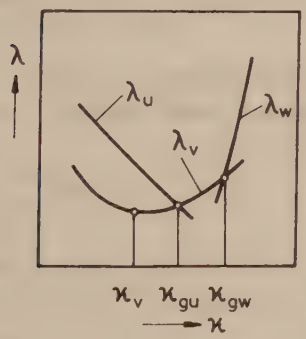

Bild 17 $\kappa_v < \kappa_{gu} < \kappa_{gw}$

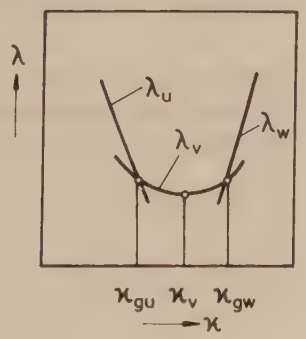

Bild 18 $\kappa_{gu} < \kappa_v < \kappa_{gw}$

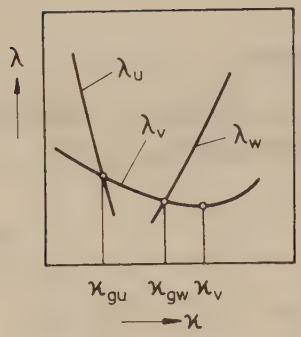

Bild 19 $\kappa_v > \kappa_{gw} > \kappa_{gu}$

Bilder 17 bis 19
Qualitativer Verlauf von λ-Funktionen abhängig vom Auslegungsverhältnis κ bei konstanten Werten für das Stellverhältnis $\ddot{y}$ und den Arbeitsmaschinenexponenten ν

Es gelten

$$\kappa \leq \kappa_{gu} \quad : \quad \lambda_u = \lambda_{ua} + \lambda_{ub} \tag{91}$$

$$\kappa_{gu} \leq \kappa \leq \kappa_{gw} \quad : \quad \lambda_v = \lambda_{va} + \lambda_{vb} \tag{92}$$

$$\kappa \geq \kappa_{gw} \quad : \quad \lambda_w = \lambda_{wa} + \lambda_{wb} \tag{93}$$

Setzt man in die von κ abhängigen λ-Funktionen $\kappa = \kappa_h$ ein, so erhält man unter Berücksichtigung der zutreffenden Bedingung aus Gl. (91), (92) oder (93)

$$\lambda_{1h} = \lambda_{ah} + \lambda_{b1h} \tag{94}$$

$$\lambda_{2h} = \lambda_{ah} + \lambda_{b2h} \tag{95}$$

mit λ_1 nach Gl. (26) oder (28)

$$\alpha_{1h} = \frac{\lambda_{1h}}{\lambda_1} \tag{96}$$

und mit λ_2 nach Gl. (27) oder (28)

$$\alpha_{2h} = \frac{\lambda_{2h}}{\lambda_2} \tag{97}$$

6.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$

Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung für $\nu \leq 0$

Analog den Bildern 17 bis 19 sind

$$\kappa_{gu} = \kappa_{g1} \tag{98}$$

$$\kappa_{v} = \kappa_{1} \tag{99}$$

$$\kappa_{gw} = \kappa_{g2} \tag{1oo}$$

Somit ergeben sich mit den Gl. (42), (43), (64) und (65) die Beziehungen

$$\lambda_{ua} = 1 - \frac{\kappa}{\varphi} \tag{1o1}$$

$$\lambda_{va} = \lambda_{wa} = \kappa - 1 \tag{1o2}$$

$$\lambda_{ub1} = \lambda_{vb1} = \frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right) \tag{1o3}$$

$$\lambda_{wb1} = \kappa - 1 \tag{1o4}$$

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{\varphi-\kappa}{\varphi}\left(1 + \frac{1}{\varphi^{\nu}}\right) \tag{1o5}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \kappa\left(1 - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}}\right) - 1 + \frac{1}{\varphi^{\nu}} \tag{1o6}$$

$$\lambda_{w1} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb1} = 2\,(\kappa - 1) \tag{1o7}$$

Da entsprechend Bild 17 mit zunehmendem κ die Funktion λ_{u1} fällt und die Funktionen λ_{v1} sowie λ_{w1} steigen, folgt mit Gl. (41)

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g1} = \frac{2\varphi}{\varphi+1} \tag{1o8}$$

und den Gl. (1o1) und (1o3)

$$\lambda_{albest} = \frac{\varphi-1}{\varphi+1} \tag{1o9}$$

$$\lambda_{b1best} = \frac{1}{\varphi^{\nu}}\,\frac{\varphi-1}{\varphi+1} \tag{11o}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{b1best} = \frac{\varphi-1}{\varphi+1}\left(1 + \frac{1}{\varphi^{\nu}}\right) \tag{111}$$

und ferner mit Gl. (26) die Vergleichszahl

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{(\varphi-1)}{(\varphi+1)} \tag{112}$$

Nach den Gl. (1o1), (1o2), (67), (68) und (71) werden

$$\lambda_{ub2} = \frac{\varphi-\kappa}{\varphi}\sqrt{\frac{1}{\varphi^{3\nu}}} \tag{113}$$

$$\lambda_{vb2} = \sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{1}{\varphi\nu}\left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{114}$$

$$\lambda_{wb2} = \kappa - 1 \tag{115}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{\varphi-\kappa}{\varphi}\left(1 + \sqrt{\frac{1}{\varphi 3\nu}}\right) \tag{116}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \kappa - 1 + \sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{1}{\varphi\nu}\left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{117}$$

$$\lambda_{w2} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb2} = 2\,(\kappa - 1) \tag{118}$$

Entwprechend den Bildern 17 bis 19 fällt die Funktion λ_{u2} und steigt die Funktion λ_{w2} mit wachsendem κ. Hingegen weist λ_{v2} an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_1$ ein Minimum auf. κ_1 folgt aus

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{119}$$

mit

$$\kappa_1 = \sqrt[3]{1 - \frac{b+c}{2} + \sqrt{\left(1 - \frac{b+c}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{3} - 1\right)^3}} + \sqrt[3]{1 - \frac{b+c}{2} - \sqrt{\left(1 - \frac{b+c}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{3} - 1\right)^3}} + 1 \tag{120}$$

wobei

$$b = \frac{3\,(4\varphi^{3(\nu+1)} + 2\varphi - \varphi^2 + 3}{4\,(\varphi^{3(\nu+1)} + 1)} \tag{121}$$

$$c = -\frac{4\varphi^{3(\nu+1)} + \varphi^3 - 6\varphi^2 + 9\varphi}{4\,(\varphi^{3(\nu+1)} + 1)} \qquad (122)$$

Bild 2o zeigt die ausgewerteten Gl. (121), (122) und (12o).

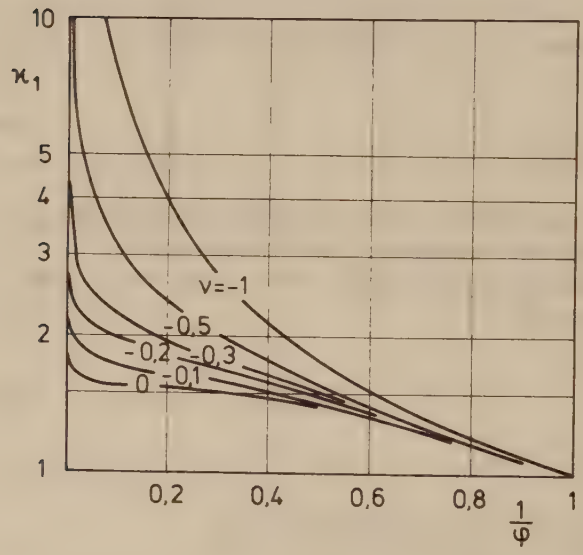

Bild 2o Auslegungsverhältnis κ_1 abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$ und Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

Nach den Bildern 17 bis 19 kommt man bedingungsgemäß zu den Ergebnissen

$$\kappa_1 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \qquad (123)$$

$$\kappa_{g1} \leq \kappa_1 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_1 \tag{124}$$

$$\kappa_1 \geq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{125}$$

und mit den Gl. (1o2) und (114) zu

$$\lambda_{a2best} = \kappa_{2best} - 1 \tag{126}$$

$$\lambda_{b2best} = \sqrt{\frac{1}{\kappa_{2best}^{-1}} \left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa_{2best}}{\varphi}\right) \right]^3} \tag{127}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \kappa_{2best} - 1 + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{2best}^{-1}} \left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa_{2best}}{\varphi}\right) \right]^3} \tag{128}$$

ferner mit Gl. (27) zu der Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\varphi^{3\nu}} \left[\kappa_{2best}^{-1} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{2best}^{-1}} \left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa_{2best}}{\varphi}\right) \right]^3} \right]}{1 + \sqrt{\varphi^{3\nu}}} \tag{129}$$

Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung für $\nu < 0$

Unter Berücksichtigung der Gl. (43), (45) und (46) bleiben für $\kappa_{best} \geq 2$ die für den Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung ermittelten Gl. (98) bis (129) gültig. für

$$\kappa = \kappa_{best} \leq 2 \tag{13o}$$

sind analog Bild 17

$$\kappa_{gu} = \kappa_{g2} \tag{131}$$

$$\kappa_{gw} = 2 \tag{132}$$

Die Funktion λ_w existiert nicht. Mit den Gl. (46), (64) und (65) folgen

$$\lambda_{ua} = \lambda_{va} = 1 \tag{133}$$

$$\lambda_{ub1} = \frac{1}{\vartheta^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\vartheta}\right) \tag{134}$$

$$\lambda_{vb1} = \kappa - 1 \tag{135}$$

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = 1 + \frac{1}{\vartheta^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\vartheta}\right) \tag{136}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \kappa \tag{137}$$

Gemäß Bild 17 fällt λ_{u1} und steigt λ_{v1} mit wachsendem κ. Dies bedeutet mit Gl. (54)

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g2} = \frac{\vartheta + \vartheta^{\nu+1}}{1+\vartheta^{\nu+1}} \tag{138}$$

$$\lambda_{albest} = 1 \tag{139}$$

$$\lambda_{b1best} = \frac{\vartheta - 1}{1+\vartheta^{\nu+1}} \tag{14o}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{blbest} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}} = \kappa_{g2} \tag{141}$$

und mit Gl. (26)

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{\varphi^{\nu}}{1+\varphi^{\nu}} \frac{\varphi+\varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{142}$$

ferner erhält man mit den Gl. (133), (69) und (72)

$$\lambda_{ub2} = \sqrt{\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{143}$$

$$\lambda_{vb2} = \sqrt{(\kappa - 1)^3} \tag{144}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = 1 + \sqrt{\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{145}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = 1 + \sqrt{(\kappa - 1)^3} \tag{146}$$

Auch λ_{u2} fällt und λ_{v2} steigt mit zunehmendem κ, so daß folgen

$$\kappa_{2best} = \kappa_{1best} = \kappa_{g2} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{147}$$

$$\lambda_{a2best} = 1 \tag{148}$$

$$\lambda_{b2best} = \sqrt{\left(\frac{\varphi - 1}{1+\varphi^{\nu+1}}\right)^3} \tag{149}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = 1 + \sqrt{\left(\frac{\varphi - 1}{1+\varphi^{\nu+1}}\right)^3} \tag{150}$$

mit Gl. (27)

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\varphi^{3\nu}}\left[1 + \sqrt{\left(\frac{\varphi - 1}{1+\varphi^{\nu+1}}\right)^3}\right]}{1 + \sqrt{\varphi^{3\nu}}} \tag{151}$$

6.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$

Auslegungsverhältnis-Bedingung $\kappa \geq \kappa_{g3}$ mit κ_{g3} nach Gl. (60)

Gemäß den Bildern 17 bis 19 sind

$$\kappa_{gu} = \kappa_{g2} \tag{152}$$

$$\kappa_v = \kappa_2 \tag{153}$$

$$\kappa_{gw} = \kappa_{g1} \tag{154}$$

Mit den Gl. (42), (43), (64) und (65) folgen

$$\lambda_{ua} = \lambda_{va} = 1 - \frac{\kappa}{\varphi} \tag{155}$$

$$\lambda_{wa} = \kappa - 1 \tag{156}$$

$$\lambda_{ub1} = \frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right) \tag{157}$$

$$\lambda_{vb1} = \lambda_{wb1} = \kappa - 1 \tag{158}$$

λ_{u1} nach Gl. (1o5)

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \kappa \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{159}$$

λ_{w1} nach Gl. (1o7)

mit Gl. (54)

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g2} = \frac{\varphi + \varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{16o}$$

mit den Gl. (155) und (157)

$$\lambda_{albest} = \frac{\varphi^{\nu+1} - \varphi^{\nu}}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{161}$$

$$\lambda_{blbest} = \frac{\varphi - 1}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{162}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{blbest} = \frac{\varphi^{\nu+1} - \varphi^{\nu} + \varphi - 1}{1 + \varphi^{\nu+1}} \tag{163}$$

sowie mit Gl. (28)

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{\varphi^{\nu+1} - \varphi^{\nu} + \varphi - 1}{2\ (1 + \varphi^{\nu+1})} \tag{164}$$

Mit den Gl. (67) und (71) erhält man λ_{ub2} nach Gl. (113), λ_{wb2} nach Gl. (115), mit Gl. (155) λ_{u2} nach Gl. (116) und mit Gl. (156) λ_{w2} nach Gl. (118). Mit den Gl. (7o) und (155) werden

$$\lambda_{vb2} = \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa} (\kappa - 1)^3} \tag{165}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \frac{\varphi - \kappa}{\varphi} + \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa} (\kappa - 1)^3} \tag{166}$$

$\kappa_v = \kappa_2$ in den Bildern 17 bis 19 bekommt man aus Gl. (119) mit

$$\kappa_2 = \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2} + \sqrt{(-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2})^2 + (\frac{b}{3} - \frac{a^2}{9})^3}} + \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2} - \sqrt{(-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2})^2 + (\frac{b}{3} - \frac{a^2}{9})^3}} - \frac{a}{3} \tag{167}$$

wobei

$$a = -\frac{3\varphi^2 + 3\varphi}{\varphi + 1} \tag{168}$$

$$b = \frac{2{,}25\varphi^3 + 4{,}5\varphi^2 - 0{,}75\varphi}{+ 1} \tag{169}$$

$$c = -\frac{3{,}25\varphi^3 - 1{,}5\varphi^2 + 0{,}25\varphi}{\varphi + 1} \tag{170}$$

Bild 21 zeigt die Auswertung der Gl. (168), (169), (170) und (167).

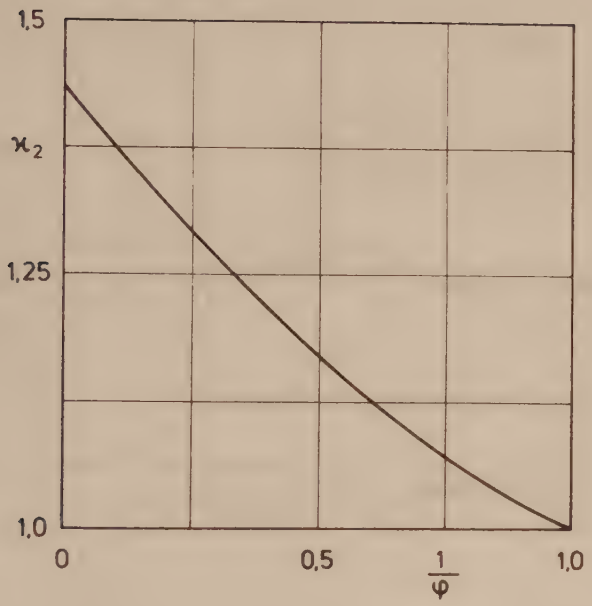

Bild 21 Auslegungsverhältnis κ_2 abhängig vom Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

Die Bilder 17 bis 19 führen zu den Ergebnissen

$$\kappa_2 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{171}$$

$$\kappa_{g2} \leq \kappa_2 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_2 \tag{172}$$

$$\kappa_2 \geq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \tag{173}$$

und mit den Gl. (155) und (165) werden

$$\lambda_{a2best} = 1 - \frac{\kappa_{2best}}{\varphi} \tag{174}$$

$$\lambda_{b2best} = \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best} - 1)^3} \tag{175}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \frac{\varphi - \kappa_{2best}}{\varphi} + \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best} - 1)^3} \tag{176}$$

und mit Gl. (28) folgt die Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\varphi - \kappa_{2best}}{\varphi} + \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best} - 1)^3} \right] \tag{177}$$

Auslegungsverhältnis-Bedingung $\kappa \leq \kappa_{g3}$ mit κ_{g3} nach Gl. (6o)

Gemäß den Bildern 17 bis 19 sind

$$\kappa_{gu} = \kappa_{g4} \tag{178}$$

$$\kappa_{v} = \kappa_{2} \tag{179}$$

$$\kappa_{gw} = \kappa_{g1} \tag{18o}$$

Für $\lambda_{ua} = \lambda_{va}$ gilt Gl. (155) und für λ_{wa} Gl. (156).
Mit Gl. (66) wird

$$\lambda_{ub1} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu}} \tag{181}$$

$\lambda_{vb1} = \lambda_{wb1}$ folgt nach Gl. (158).

Somit erhält man

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{\varphi - \kappa}{\varphi} + \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu}} \tag{182}$$

λ_{v1} nach Gl. (159)

λ_{w1} nach Gl. (1o7)

mit κ_{g4} nach Gl. (62) bzw. Bild 15

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g4} \tag{183}$$

$$\lambda_{albest} = \frac{\varphi - \kappa_{g4}}{\varphi} \tag{184}$$

$$\lambda_{b1best} = \kappa_{g4} - 1 \tag{185}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{b1best} = \kappa_{g4} \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{186}$$

und mit Gl. (26)

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{1}{2} \kappa_{g4} \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{187}$$

Mit Gl. (73) ergibt sich

$$\lambda_{ub2} = \sqrt{\frac{\psi}{\psi - \kappa}\left[\frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}}\,\frac{1}{\kappa^{\nu}}\right]^3} \qquad (188)$$

Es gelten für λ_{vb2} Gl. (165) und für λ_{wb2} Gl. (115) und ferner für

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{\psi - \kappa}{\psi} + \sqrt{\frac{\psi}{\psi - \kappa}\left[\frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}}\,\frac{1}{\kappa^{\nu}}\right]^3} \qquad (189)$$

für λ_{v2} Gl. (166) und für λ_{w2} Gl. (118).

Da die Funktion λ_{u2} nach Gl. (189) im Gültigkeitsbereich $\kappa \leq \kappa_{g4}$ mit wachsendem κ fällt, gelten entsprechend den Bildern 17 bis 19 $\kappa_v = \kappa_2$ nach den Gl. (167) bis (17o) bzw. nach Bild 21 und bei

$$\kappa_2 \leq \kappa_{g4} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g4} \qquad (19o)$$

$$\kappa_{g4} \leq \kappa_2 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_2 \qquad (191)$$

$$\kappa_2 \geq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \qquad (192)$$

mit λ_{a2best} nach Gl. (174), λ_{b2best} nach Gl. (175), λ_{2min} nach Gl. (176) und α_2 nach Gl. (177).

6.4. Zusammenfassung

Tafel 1 enthält für Entscheidungen notwendige Auslegungsverhältnisse κ, Tafel 2 führt optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} auf und Tafel 3 beinhaltet optimale Auslegungsverhältnisse κ_h. Die Tafeln 4, 5 und 6 geben Gleichungs-

nummern an, und zwar bei Auslegung mit κ_{best} Tafel 4 für λ-Funktionen und Vergleichszahlen α, Tafel 5 für maximale absolute bezogene hydrostatischen Leistungen sowie bei Auslegung mit κ_h Tafel 6 für λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h.

Tafel 1 Entscheidungs-Auslegungsverhältnisse κ abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Stellverhältnis φ

$\kappa_{g1} = \frac{2\varphi}{\varphi+1}$	$\kappa_{g6} = \frac{\nu+1}{\nu+2}\varphi$
$\kappa_{g2} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}}$	κ_{g7} nach Bild 16 bzw. Gl. (85)
$\kappa_{g3} = \frac{\nu}{\nu+1}\varphi$	κ_1 nach Bild 2o bzw. Gl. (12o) bis (122)
κ_{g4} nach Bild 15	κ_2 nach Bild 21 bzw. Gl. (167 bis (17o)
$\kappa_{g5} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+2}}{1+\varphi^{\nu+2}}$	

Tafel 2 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} für minimale Verdrängungsvolumen-Summe

ν	Bedingungen	κ_{1best}	κ_{2best}
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \geq 2$	κ_{g1}	$\kappa_1 \leq \kappa_{g1}$: κ_{g1} $\kappa_{g1} \leq \kappa_1 \leq \kappa_{g2}$: κ_1 $\kappa_1 \geq \kappa_{g2}$: κ_{g2}
<0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	κ_{g2}	κ_{g2}
>0	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$	κ_{g2}	$\kappa_2 \leq \kappa_{g2}$: κ_{g2} $\kappa_{g2} \leq \kappa_2 \leq \kappa_{g1}$: κ_2 $\kappa_2 \geq \kappa_{g1}$: κ_{g1}
	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$	κ_{g4}	$\kappa_2 \leq \kappa_{g4}$: κ_{g4} $\kappa_{g4} \leq \kappa_2 \leq \kappa_{g1}$: κ_2 $\kappa_2 \geq \kappa_{g1}$: κ_{g1}

Tafel 3 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_h für minimale absolute bezogene hydrostatischen Leistungen $\min |P_h/P_{1+}|_{max} = \kappa_h - 1$

Bedingungen	κ_h
$\kappa_{g5} \geq \kappa_{g6}$	κ_{g5}
$\kappa_{g7} \leq \kappa_{g6}$	κ_{g7}

Tafel 4 λ-Funktionen und Vergleichszahlenα bei Auslegung mit κ_{best} auf minimale Verdrängungsvolumen-Summe

ν	Bedingungen	Gleichungsnummern							
		λ_{a1best}	λ_{b1best}	λ_{1min}	α_1	λ_{a2best}	λ_{b2best}	λ_{2min}	α_2
≤ 0	ohne Drehmomentbegr. mit Drehmomentbegr. bei $\kappa_{best} \geq 2$	1o9	11o	111	112	126	127	128	129
<0	mit Drehmomentbegr. bei $\kappa_{best} \leq 2$	139	14o	141	142	148	149	15o	151
>0	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$	161	162	163	164	174	175	176	177
	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$	184	185	186	187	174	175	176	177

Tafel 5 Maximale absolute bezogene hydrostatische Leistungen $|P_h/P_{1+}|_{max}$ bei Auslegung mit κ_{best} auf minimale Verdrängungsvolumen-Summe

Bedingungen	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g5}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g7}$	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g5}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \leq \kappa_{g7}$
Gleichungs-nummern	85	85	86	87

Tafel 6 λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h bei Auslegung mit κ_h auf das Minimum der maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen $\min |P_h/P_{1+}|_{max}$

ν	Bedingungen		Gleichungsnummern λ_{ah}	λ_{b1h}	λ_{1h}	λ_{b2h}	λ_{2h}
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung	$\kappa_h \leq \kappa_{g1}$	101	103	105	113	116
		$\kappa_{g1} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g2}$	102	103	106	114	117
	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \geq 2$	$\kappa_h \geq \kappa_{g2}$	102	104	107	115	118
< 0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \leq 2$	$\kappa_h \leq \kappa_{g2}$	133	134	136	143	145
		$\kappa_{g2} \leq \kappa_h \leq 2$	133	135	137	144	146
> 0	$\kappa_h \geq \kappa_{g3}$	$\kappa_h \leq \kappa_{g2}$	155	157	105	113	116
		$\kappa_{g2} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g1}$	155	158	159	165	166
		$\kappa_h \geq \kappa_{g1}$	156	158	107	115	118
	$\kappa_h \leq \kappa_{g3}$	$\kappa_h \leq \kappa_{g4}$	155	181	182	188	189
		$\kappa_{g4} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g1}$	155	158	159	165	166
		$\kappa_h \geq \kappa_{g1}$	156	158	107	115	118

α_{1h} nach Gl. (96), α_{2h} nach Gl. (97) mit λ_1 nach Gl. (26), λ_2 nach Gl. (27) für $\nu \leq 0$ und mit $\lambda_1 = \lambda_2$ nach Gl. (28) für $\nu > 0$

Die Auswertungen der zu den Tafeln 1 bis 6 gehörenden Beziehungen sind in den Bildern dargestellt, die der Band II geordnet nach den Arbeitsmaschinenexponenten ν: -1, o, 1, 2 enthält.

7. Hydrostatisches Koppelgetriebe B

7.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen

Nach Bild 8 gilt mit Gl. (6)

$$|T_a| = |T_2| \frac{|i_{1r}|}{|i_{1q}|} |i_{gk}| = |T_2| \frac{|1-i_{1q}|}{|i_{1q}|} |i_{gk}| \tag{193}$$

mit $\kappa = i_{1q}/i_{12+}$, i_{gk} nach Gl. (35) und T_2 nach Gl. (13) folgen

$$|T_a| = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{194}$$

$$|T_a|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu}_{max} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{195}$$

und mit Gl. (29)

$$\lambda_a = \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu}_{max} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{196}$$

Für Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$ erhält man

$$\lambda_a = \frac{1}{\psi^{\nu}} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{197}$$

Im Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung liegt nach Bild 22 $|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}|_{max}$ entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12\Delta} = 1/\varphi$.

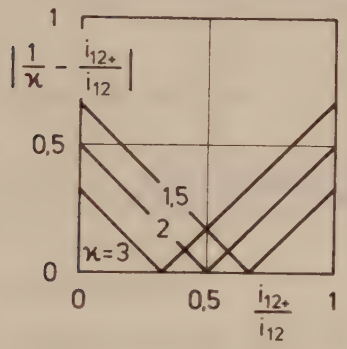

Bild 22 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von $|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}|_{max}$ für das Koppelgetriebe B

Die Entscheidungshilfe bringt der Ansatz

$$|\frac{1}{\kappa_{g1}} - 1| = |\frac{1}{\kappa_{g1}} - \frac{1}{\varphi}| \tag{198}$$

mit

$$\kappa_{g1} = \frac{2\varphi}{\varphi+1} \tag{199}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g1} : \quad \lambda_a = \frac{1}{\varphi^\nu}\,(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}) \tag{200}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g1} : \quad \lambda_a = \frac{1}{\varphi^\nu}\,(1 - \frac{1}{\kappa}) \tag{201}$$

Im Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung tritt $\left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max}$ entweder bei $i_{12}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12} = 0$ auf. Somit folgt

$$\left|\frac{1}{\kappa_{gl}} - 1\right| = \frac{1}{\kappa_{gl}} \qquad (202)$$

mit

$$\kappa_{gl} = 2 \qquad (203)$$

$$\nu \leq 0 \;;\; \kappa \leq 2 : \quad \lambda_a = \frac{1}{\varphi^{\nu}\,\kappa} \qquad (204)$$

Für $\kappa \geq \kappa_{gl} = 2$ bleibt hier Gl. (201) gültig. Auch bei dem Koppelgetriebe B wirkt sich die Möglichkeit des Anfahrens der Arbeitsmaschine aus dem Stillstand bei laufender Kraftmaschine nur für $\kappa < 2$ auf das maximale Drehmoment der Verdrängermaschine mit der Welle a aus.

Für Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$ bekommt man

$$\nu > 0;\; \kappa \leq \kappa_{gl} : \quad \lambda_a = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi} \qquad (205)$$

$$\nu > 0 \;;\kappa \geq \kappa_{gl} : \quad \lambda_a = 1 - \frac{1}{\kappa} \qquad (206)$$

Nach Bild 8 gilt ferner

$$T_1 + \frac{T_2}{i_{1q}} + T_b\, i_{ef} = 0 \qquad (207)$$

$$|T_b| = \frac{|T_1 + \frac{T_2}{i_{1q}}|}{|i_{ef}|} \tag{208}$$

mit

$$|i_{ef}| = \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_1|_{max}} = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_1|_{max}} \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \tag{209}$$

und mit den Gl. (49) und (13)

$$|T_b| = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right| \tag{210}$$

ferner mit Gl. (29)

$$\lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left|\frac{1}{\kappa} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right|_{max} \tag{211}$$

mit $|\omega_a|_{max}/|\omega_b|_{max}$ nach Gl. (20) für λ_{b1} und nach Gl. (22) für λ_{b2}.

Für $\nu \leq 0$ kann $\left|\frac{1}{\kappa} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right|_{max}$ in Gl. (211) je nach der Größe von κ bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder bei $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$ liegen. Bild 23 macht dies am Beispiel mit $\nu = -1$ deutlich.

Die Entscheidungshilfe erhält man aus dem Ansatz

$$\left|\frac{1}{\kappa_{g2}} - 1\right| = \left|\frac{1}{\kappa_{g2}} \frac{1}{\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}}\right| \tag{212}$$

mit

$$\kappa_{g2} = \frac{\psi + \psi^{\nu+1}}{1 + \psi^{\nu+1}} \tag{213}$$

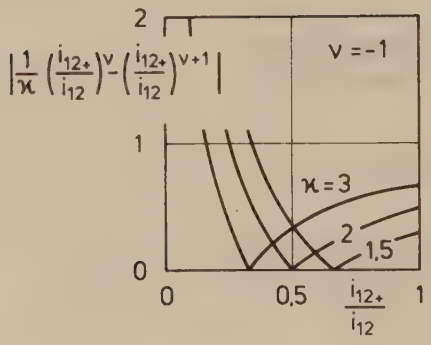

Bild 23 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von $\left|\frac{1}{\kappa}\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right|_{max}$ bei Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$ für das Koppelgetriebe B

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}: \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \frac{1}{\psi^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\psi}\right) \tag{214}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}: \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{215}$$

Für $\nu > 0$ muß man das vorhandene Maximum aus

$$\frac{d}{d\,\frac{i_{12+}}{i_{12}}} \left|\frac{1}{\kappa}\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right| = 0 \tag{216}$$

an der Stelle

$$\frac{i_{12+}}{i_{12}} = \frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa} \tag{217}$$

mitberücksichtigen.

Bild 24 zeigt dies an einem Beispiel mit $\nu = 1$.

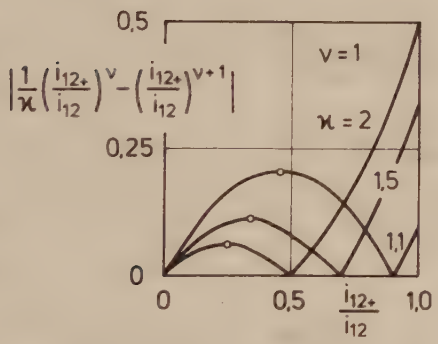

Bild 24 Diagramm zur Veranschaulichung der Ermittlung von $\left|\frac{1}{\kappa}\ (\frac{i_{12+}}{i_{12}})^{\nu}\ -\ (\frac{i_{12+}}{i_{12}})^{\nu+1}\right|_{max}$ bei Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$ für das Koppelgetriebe B

Die Stelle nach Gl. (217) kann aber nur in Betracht kommen, wenn

$$\frac{1}{\kappa} \leq \frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa} \tag{218}$$

Daraus folgt die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g3} = \frac{\nu}{\nu+1}\psi \tag{219}$$

Für $\kappa \geq \kappa_{g3}$ bleiben die Gl. (214) und (215) gültig, während für $\kappa \leq \kappa_{g3}$ der Wert

$$\left|\frac{1}{\kappa}\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1}\right|_{max}$$

entweder bei $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder an der Stelle nach Gl. (217) liegt. Die Bedingung

$$\left|\frac{1}{\kappa_{g4}}\left[\frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa_{g4}}\right]^{\nu} - \left[\frac{\nu}{(\nu+1)\ \kappa_{g4}}\right]^{\nu+1}\right| = \left|\frac{1}{\kappa_{g4}} - 1\right| \tag{220}$$

bringt die Entscheidungshilfe

$$\kappa_{g4}{}^{\nu+1} - \kappa_{g4}{}^{\nu} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \tag{221}$$

$$\nu > 0; \qquad \kappa \leq \kappa_{g3} \quad \kappa \leq \kappa_{g4} \quad : \quad \lambda_b = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} \tag{222}$$

Für $\kappa \geq \kappa_{g4}$ trifft Gl. (215) zu.

Verglichen mit Koppelgetriebe A sind folgende Gleichungen identisch: (41) und (199), (45) und (203), (54) und (213), (57) und (216), (58) und (217), (59) und (218), (60) und (219), (61) und (220), (62) und (221).

Die Kurve nach Gl. (221) bzw. (62) ist im Bild 15 aufgetragen.

Mit den Gl. (20), (214), (215) und (222) folgen bedingungsgemäß

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \leq \kappa_{g2} \end{array}\right\} \qquad \lambda_{b1} = \frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{223}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \geq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \qquad \lambda_{b1} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{224}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3} \\ \qquad \kappa \leq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \qquad \lambda_{b1} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} \tag{225}$$

und mit den Gl. (22), (200), (201), (204), (205), (206), (214), (215) und (222) erhält man bedingungsgemäß

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2} \\ \qquad \kappa \leq \kappa_{g1} \end{array}\right\} \qquad \lambda_{b2} = \frac{\varphi - \kappa}{\kappa \varphi^{\nu+1}} \tag{226}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa} \sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(1-\frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^{3}} \qquad (227)$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa} \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi-\kappa}\,(\kappa-1)^{3}} \qquad (228)$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa}\,(\kappa-1) \qquad (229)$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq 2$

Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa\,\varphi^{\nu}} \sqrt{\left(\frac{\varphi-\kappa}{\varphi}\right)^{3}} \qquad (230)$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq 2$

Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\varphi^{\nu}\,(\kappa-1)^{3}} \qquad (231)$$

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa}\,\frac{\varphi-\kappa}{\varphi} \sqrt{\frac{1}{\varphi^{3\nu}}} \qquad (232)$$

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \leq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{1}{\kappa - 1} \frac{1}{\mathcal{J}^{\nu}} \left(1 - \frac{\kappa}{\mathcal{J}}\right)^3} \tag{233}$$

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g4}$

$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{J} - \kappa} (\kappa - 1)^3} \tag{234}$$

$\nu > 0;\ \kappa \geq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g2}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

oder

$\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}$

$\kappa \geq \kappa_{g4}$

$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{235}$$

$$\left.\begin{array}{l}\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}\\ \kappa \leq \kappa_{g4}\\ \kappa \leq \kappa_{g1}\end{array}\right\} \qquad \lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{\varphi}{\kappa^{3\nu}\,(\tau-\kappa)}\left[\frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}}\right]^{3}} \qquad (236)$$

$$\left.\begin{array}{l}\nu > 0;\ \kappa \leq \kappa_{g3}\\ \kappa \leq \kappa_{g4}\\ \kappa \geq \kappa_{g1}\end{array}\right\} \qquad \lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{\nu^{\nu}}{\kappa^{\nu}\,(\nu+1)^{\nu+1}}\right]^{3}} \qquad (237)$$

Mit λ_A für das Koppelgetriebe A und λ_B für das Koppelgetriebe B besteht folgender Zusammenhang zwischen den λ-Funktionen

$$\nu \leq 0: \quad \lambda_{Aa} = \lambda_{Ba}\,\varphi^{\nu}\,\kappa \qquad (238)$$

$$\lambda_{Ab1} = \lambda_{Bb1}\,\kappa \qquad (239)$$

$$\lambda_{Ab2} = \lambda_{Bb2}\,\frac{\kappa}{\varphi^{\nu}} \qquad (240)$$

$$\nu > 0: \quad \lambda_{Aa} = \lambda_{Ba}\,\kappa \qquad (241)$$

$$\lambda_{Ab1} = \lambda_{Bb1}\,\kappa \qquad (242)$$

$$\lambda_{Ab2} = \lambda_{Bb2}\,\kappa \qquad (243)$$

7.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen

Nach [4] Gl. (67b) gilt unter Berücksichtigung der vertauschten Beziehungen 1; q

$$\frac{P_h}{P_1} = 1 - \frac{i_{12}}{i_{1q}} = 1 - \frac{1}{\kappa}\,\frac{i_{12}}{i_{12+}} \tag{244}$$

Ferner folgt mit Gl. (13) bzw. (76)

$$\left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} - \frac{1}{\kappa}\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu}\right|_{max} \tag{245}$$

Für $\nu \leq 0$ liegt z.B. nach Bild 23 $|P_h/P_{1+}|_{max}$ entweder an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ oder aber an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$. Die Entscheidungshilfe erhält man aus dem Ansatz nach Gl. (212) mit κ_{g2} nach Gl. (213).

Für $\nu > 0$ muß man z.B. nach Bild 24 noch das vorhandene Maximum an der Stelle i_{12+}/i_{12} nach Gl. (217) und ferner die Gl. (218) bis (221) berücksichtigen.

Für die maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen bei optimalen Auslegungsverhältnissen κ_{best} gelten somit folgende Beziehungen, wobei mit sig das Vorzeichen des hydrostatischen Leistungsflusses angegeben ist.

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0;\quad \kappa_{best} \leq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0;\quad \kappa_{best} \geq \kappa_{g3} \\ \qquad\quad \kappa_{best} \leq \kappa_{g2} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(\frac{1}{\kappa_{best}} - \frac{1}{\varphi}\right) \quad \text{mit sig-} \tag{246}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu \leq 0; \quad \kappa_{best} \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0; \quad \kappa_{best} \geq \kappa_{g3} \\ \qquad\quad \kappa_{best} \geq \kappa_{g2} \\ \text{oder} \\ \nu > 0; \quad \kappa_{best} \leq \kappa_{g3} \\ \qquad\quad \kappa_{best} \geq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa_{best}} \quad \text{mit sig +} \tag{247}$$

$$\left.\begin{array}{l} \nu > 0; \quad \kappa_{best} \leq \kappa_{g3} \\ \qquad\quad \kappa_{best} \leq \kappa_{g4} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa_{best}^{\nu+1}} \quad \text{mit sig -} \tag{248}$$

7.3. Optimale Auslegungsverhältnisse

Das Minimum der maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistungen erhält man an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ mit

$$\min \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa_h} \tag{249}$$

wenn entweder Gl. (212) oder aber Gl. (22o) erfüllt ist und somit

$$\kappa_h = \kappa_{g2} \geq \kappa_{g3} \tag{25o}$$

oder

$$\kappa_h = \kappa_{g4} \leq \kappa_{g3} \tag{251}$$

Die hydrostatische Leistung hat an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ ein positives und an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1/\varphi$ bzw. i_{12+}/i_{12} nach Gl. (217) ein negatives Vorzeichen.

Auch beim Koppelgetriebe B treffen wieder die Bilder 17 bis 19 sowie die Gl. (91) bis (97) zu.

Für κ_{gu}, κ_v und κ_{gw} gelten für $\nu \leq 0$ die Gl. (98), (99), (1oo) im Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung, (131), (132) im Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung und für $\nu > 0$ die Gl. (152), (153), (154) bei $\kappa \geq \kappa_{g3}$ sowie die Gl. (178), (179), (18o) bei $\kappa \leq \kappa_{g3}$.

7.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$

Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung für $\nu \leq 0$

Mit den Gl. (2oo), (2o1), (223), (224) folgen

$$\lambda_{ua} = \frac{1}{\varphi^\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{252}$$

$$\lambda_{va} = \lambda_{wa} = \frac{1}{\varphi^\nu} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{253}$$

$$\lambda_{ub1} = \lambda_{vb1} = \frac{1}{\varphi^\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{254}$$

$$\lambda_{wb1} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{255}$$

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{2}{\varphi^\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{256}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \frac{1}{\varphi^\nu} \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{257}$$

$$\lambda_{w1} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb1} = (1 - \frac{1}{\kappa}) \quad (1 + \frac{1}{\nu}) \tag{258}$$

Mit zunehmendem κ fällt λ_{u1}, bleibt λ_{v1} konstant und steigt λ_{w1}. Somit wird

$$\kappa_{g1} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g2} \tag{259}$$

Mit $\kappa_h = \kappa_{g2}$ nach Gl. (25o) erhält man aber
$\min |P_h/P_{1+}|_{max}$, so daß es sich empfiehlt,

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g2} \tag{26o}$$

zu setzen.

Es werden

$$\lambda_{albest} = \frac{1}{\nu} \quad (1 - \frac{1}{\kappa_{1best}}) \tag{261}$$

$$\lambda_{b1best} = \frac{1}{\nu} \quad (\frac{1}{\kappa_{1best}} - \frac{1}{\ddot{y}}) \tag{262}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{b1best} = \frac{1}{\ddot{y}\nu} \quad (1 - \frac{1}{\ddot{y}}) \tag{263}$$

mit Gl. (26) die Vergleichszahl

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{\ddot{y} - 1}{\ddot{y} + \ddot{y}^{\nu+1}} \tag{264}$$

mit den Gl. (252), (253), (226), (227) und (229)

$$\lambda_{ub2} = \frac{\ddot{y} - \kappa}{\kappa \ddot{y}^{\nu+1}} \tag{265}$$

$$\lambda_{vb2} = \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa} \sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{266}$$

$$\lambda_{wb2} = \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa}\,(\kappa - 1) \tag{267}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{2}{\kappa}\,\frac{\varphi - \kappa}{\varphi^{\nu+1}} \tag{268}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) + \frac{\sqrt{\varphi^{\nu}}}{\kappa} \sqrt{\frac{1}{\kappa-1}\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}}\left(1 - \frac{\kappa}{\varphi}\right)\right]^3} \tag{269}$$

$$\lambda_{w2} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb2} = \left(\frac{1}{\varphi^{\nu}} + \sqrt{\varphi^{\nu}}\right)\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{270}$$

Entsprechend den Bildern 17 bis 19 fällt die Funktion λ_{u2} und steigt die Funktion λ_{w2} mit wachsendem κ. Hingegen weist λ_{v2} an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_3$ ein Minimum auf. κ_3 folgt aus

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{271}$$

mit

$$\kappa_3 = \frac{1{,}354}{1+0{,}354\varphi} \tag{272}$$

Gl. (272) ist im Bild 25 dargestellt.

Bedingungsgemäß kommt man zu den Ergebnissen

$$\kappa_3 \leq \kappa_{g1} \qquad : \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \tag{273}$$

$$\kappa_{g1} \leq \kappa_3 \leq \kappa_{g2} \qquad : \kappa_{2best} = \kappa_3 \tag{274}$$

$$\kappa_3 \geq \kappa_{g2} \qquad : \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{275}$$

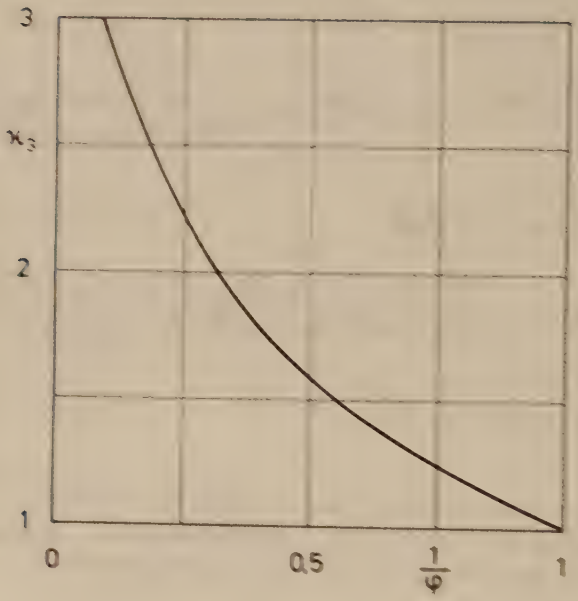

Bild 25 Auslegungsverhältnis κ_3 abhängig vom Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

und mit den Gl. (253) und (266)

$$\lambda_{a2best} = \frac{1}{\varphi V}\left(1 - \frac{1}{\kappa_{2best}}\right) \tag{276}$$

$$\lambda_{b2best} = \frac{\sqrt{\gamma V}}{\kappa_{2best}} \sqrt{\frac{1}{\kappa_{2best} - 1}\left[\frac{1}{\varphi V}\left(1 - \frac{\kappa_{2best}}{\gamma}\right)\right]^3} \tag{277}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} \tag{278}$$

sowie mit Gl. (27) zu der Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\gamma^{3\nu}}}{1+\sqrt{\gamma^{3\nu}}} \; (\lambda_{a2best} + \lambda_{b2best}) \tag{279}$$

Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung für $\nu < 0$

Unter Berücksichtigung der Gl. (2o1), (2o3) und (2o4) bleiben für $\kappa_{best} \geq 2$ die für den Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung ermittelten Gl. (252) bis (279) gültig.

Mit den Gl. (2o4), (223) und (224) folgen

$$\lambda_{ua} = \lambda_{va} = \frac{1}{\gamma^{\nu}\,\kappa} \tag{28o}$$

$$\lambda_{ub1} = \frac{1}{\gamma^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\gamma}\right) \tag{281}$$

$$\lambda_{vb1} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{282}$$

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{1}{\gamma^{\nu}} \left(\frac{2}{\kappa} - \frac{1}{\gamma}\right) \tag{283}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = 1 + \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{\gamma^{\nu}} - 1\right) \tag{284}$$

Die Kurven λ_{u1} und λ_{v1} fallen mit wachsendem κ. Sie schneiden sich bei $\kappa_{gu} = \kappa_{g2}$. Mit $\kappa_{g2} \leq 2$ werden

$$\kappa_{1best} = 2 \tag{285}$$

$$\lambda_{albest} = \frac{1}{2\gamma^{\nu}} \tag{286}$$

$$\lambda_{b1best} = \frac{1}{2} \tag{287}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{b1best} = \frac{1 + \varphi^{\nu}}{2\varphi^{\nu}} \tag{288}$$

und mit Gl. (26)

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{1}{2} \tag{289}$$

Ferner erhält man mit den Gl. (28o), (23o) und (231)

$$\lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa\varphi^{\nu}} \sqrt{\left(\frac{\varphi - \kappa}{\varphi}\right)^3} \tag{29o}$$

$$\lambda_{vb2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\varphi^{\nu}(\kappa - 1)^3} \tag{291}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa\varphi^{\nu}} \left[1 + \sqrt{\left(\frac{\varphi - \kappa}{\varphi}\right)^3}\right] \tag{292}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \frac{1}{\kappa}\left[\frac{1}{\varphi^{\nu}} + \sqrt{\varphi^{\nu}(\kappa - 1)^3}\right] \tag{293}$$

Mit zunehmendem κ fällt die Funktion λ_{u2}. Die Funktion λ_{v2} hat hingegen bei $\kappa = \kappa_v = \kappa_4$ ein Minimum. κ_4 erhält man aus

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{294}$$

mit

$$0 = -\frac{1}{\kappa_4}\frac{1}{\varphi^{\nu}} + \frac{3\varphi^{\nu}(\kappa_4 - 1)}{2\sqrt{\varphi^{\nu}(\kappa_4 - 1)}} - \frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_4}\sqrt{\varphi^{\nu}(\kappa_4 - 1)} \tag{295}$$

Gl. (295) ist im Bild 26 dargestellt.

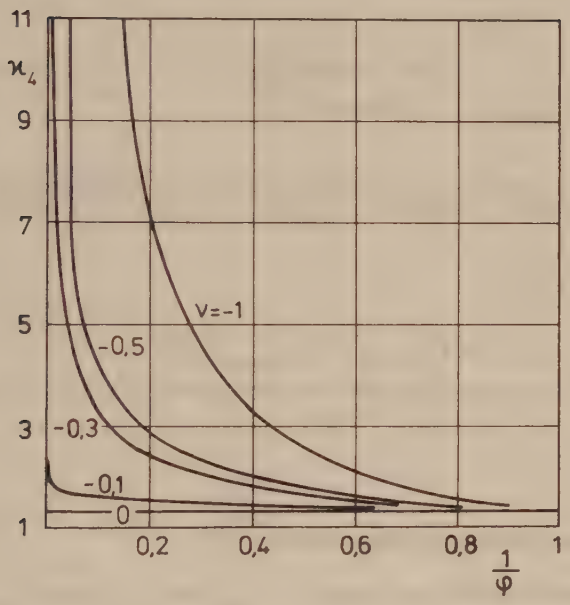

Bild 26 Auslegungsverhältnis κ_4 abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

Bedingungsgemäß kommt man zu den Ergebnissen

$$\kappa_4 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{296}$$

$$\kappa_{g2} \leq \kappa_4 \leq 2: \quad \kappa_{2best} = \kappa_4 \tag{297}$$

$$\kappa_4 \geq 2 \quad : \quad \kappa_{2best} = 2 \tag{298}$$

und mit den Gl. (28o) und (291) zu

$$\lambda_{a2best} = \frac{1}{\nu \, \kappa_{2best}} \tag{299}$$

$$\lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\nu \, (\kappa_{2best} - 1)^3} \tag{3oo}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} \left[\frac{1}{\nu} + \sqrt{\nu \, (\kappa_{2best}-1)^3} \right] \tag{3o1}$$

und mit Gl. (27)

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{3\nu} \left[\frac{1}{\nu} + \sqrt{\nu \, (\kappa_{2best}-1)^3} \right]}{(1 + \sqrt{3\nu}) \, \kappa_{2best}} \tag{3o2}$$

7.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$

Auslegungsverhältnis-Bedingung $\kappa \geq \kappa_{g3}$ mit κ_{g3} nach Gl. (219) bzw. (6o)

Mit den Gl. (2o5), (2o6), (223) und (224) folgen

$$\lambda_{ua} = \lambda_{va} = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{2} \tag{3o3}$$

$$\lambda_{wa} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{3o4}$$

$$\lambda_{ub1} = \frac{1}{2\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{2} \right) \tag{3o5}$$

$$\lambda_{vb1} = \lambda_{wb1} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{3o6}$$

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = (1 + \frac{1}{\varphi^{\nu}}) \ (\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}) \tag{3o7}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = 1 - \frac{1}{\varphi} \tag{3o8}$$

$$\lambda_{w1} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb1} = 2 \ (1 - \frac{1}{\kappa}) \tag{3o9}$$

Mit zunehmendem κ fällt λ_{u1}, bleibt λ_{v1} konstant und steigt λ_{w1}. Somit wird

$$\kappa_{g2} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g1} \tag{31o}$$

Um min $|P_h/P_{1+}|_{max}$ zu erhalten, muß man aber nach Gl. (25o)

$$\kappa_{1best} = \kappa_h = \kappa_{g2} = \frac{\varphi + \varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}} \tag{311}$$

setzen.
Es folgen

$$\lambda_{albest} = \frac{1}{\kappa_{1best}} - \frac{1}{\varphi} \tag{312}$$

$$\lambda_{b1best} = 1 - \frac{1}{\kappa_{1best}} \tag{313}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{b1best} = 1 - \frac{1}{\varphi} \tag{314}$$

mit Gl. (28) die Vergleichszahl

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{\varkappa-1}{2\varkappa} \tag{315}$$

Mit den Gl. (3o3), (3o4), (232), (234) und (235) bekommt man

$$\lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa}\,\frac{\varkappa-\kappa}{\varkappa}\,\sqrt{\frac{1}{\varkappa 3\nu}} \tag{316}$$

$$\lambda_{vb2} = \frac{1}{\kappa}\,\sqrt{\frac{\varkappa}{\varkappa-\kappa}\,(\kappa-1)^3} \tag{317}$$

$$\lambda_{wb2} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{318}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varkappa}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{1}{\varkappa 3\nu}}\right) \tag{319}$$

$$\lambda_{v2} = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varkappa} + \frac{1}{\kappa}\,\sqrt{\frac{\varkappa}{\varkappa-\kappa}\,(\kappa-1)^3} \tag{32o}$$

$$\lambda_{w2} = 2\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{321}$$

Entsprechend den Bildern 17 bis 19 fällt λ_{u2} und steigt λ_{w2} mit zunehmendem κ. λ_{v2} hat hingegen an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_5$ ein Minimum. κ_5 folgt aus

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{322}$$

mit

$$K_5 = \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2} + \sqrt{(-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2})^2 + (\frac{b}{3} - \frac{a^2}{9})^3}} + \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2} - \sqrt{(-\frac{a^3}{27} + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2})^2 + (\frac{b}{3} - \frac{a^2}{9})^3}} - \frac{a}{3} \quad (323)$$

wobei

$$a = \frac{21\varphi + 6\varphi^2 - 3\varphi^3}{-4 - 9\varphi + 6\varphi^2 - \varphi^3} \quad (324)$$

$$b = \frac{-24\varphi^2}{-4 - 9\varphi + 6\varphi^2 - \varphi^3} \quad (325)$$

$$c = \frac{8\varphi^3}{-4 - 9\varphi + 6\varphi^2 - \varphi^3} \quad (326)$$

Bild 27 zeigt die Auswertung der Gl. (324), (325), (326) und (323).

Die Bilder 17 bis 19 führen zu den Ergebnissen

$$\kappa_5 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \quad (327)$$

$$\kappa_{g2} \leq \kappa_5 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_5 \quad (328)$$

$$\kappa_5 \geq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \quad (329)$$

und mit den Gl. (3o3) und (317) werden

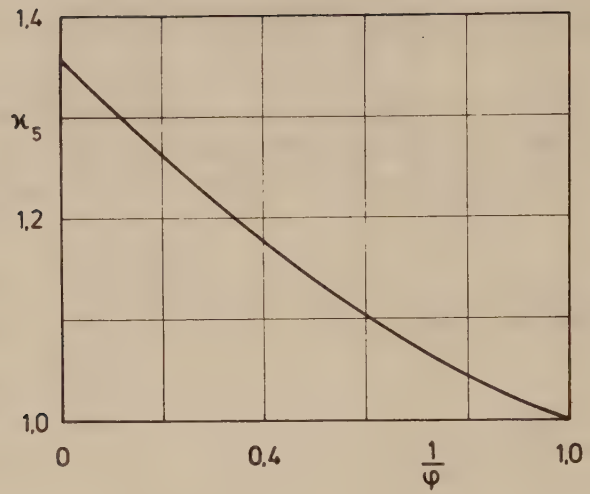

Bild 27 Auslegungsverhältnis κ_5 abhängig vom Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

$$\lambda_{a2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\varphi} \tag{33o}$$

$$\lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best} - 1)^3} \tag{331}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best}^{-1})^3} \tag{332}$$

und mit Gl. (28) die Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi - \kappa_{2best}} (\kappa_{2best}^{-1})^3} \right. \tag{333}$$

Auslegungsverhältnis-Bedingung $\kappa \leq \kappa_{g3}$ mit κ_{g3} nach Gl. (219) bzw. (6o)

Für $\lambda_{ua} = \lambda_{va}$ gilt Gl. (3o3) und für λ_{wa} Gl. (3o4). Mit Gl. (225) wird

$$\lambda_{ub1} = \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu+1}}$$

$\lambda_{vb1} = \lambda_{wb1}$ folgt nach Gl. (3o6)

Somit erhält man

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi} + \frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}} \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} \qquad (335)$$

λ_{v1} nach Gl. (3o8)

λ_{w1} nach Gl. (3o9)

mit κ_{g4} nach Gl. (221) bzw. (62), aufgetragen im Bild 15

$$\kappa_{g4} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g1} \qquad (336)$$

Um mit $|P_h/P_{1+}|_{max}$ zu erhalten, muß man aber nach Gl. (251)

$$\kappa_{1best} = \kappa_h = \kappa_{g4} \qquad (337)$$

setzen. Mit den Gl. (336) oder (337) gelten ferner für λ_{a1best} Gl. (312), λ_{b1best} Gl. (313), λ_{1min} Gl. (314) und α_1 Gl. (315).

Mit Gl. (236) ergibt sich

$$\lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\varphi}{\kappa^{3\nu}\,(\varphi-\kappa)} \left[\frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}}\right]^3} \tag{338}$$

Es gelten für λ_{vb2} Gl. (317) und für λ_{wb2} Gl. (318) und ferner für

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\varphi}{\kappa^{3\nu}\,(\varphi-\kappa)} \left[\frac{\nu^{\nu}}{(\nu+1)^{\nu+1}}\right]^3} \tag{339}$$

für λ_{v2} Gl. (32o) und λ_{w2} Gl. (321)

Da die Funktion λ_{u2} nach Gl. (339) im Gültigkeitsbereich $\kappa \leq \kappa_{g4}$ mitwachsendem κ fällt, gelten entsprechend den Bildern 17 bis 19 $\kappa_v = \kappa_5$ nach den Gl. (323) bis (326) bzw. nach Bild 27 und bei

$$\kappa_5 \leq \kappa_{g4} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g4} \tag{34o}$$

$$\kappa_{g4} \leq \kappa_5 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_5 \tag{341}$$

$$\kappa_5 \geq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \tag{342}$$

mit λ_{a2best} nach Gl. (33o), λ_{b2best} nach Gl. (331), λ_{2min} nach Gl. (332) und α_2 nach Gl. (333).

7.4. Zusammenfassung

Tafel 7 enthält für Entscheidungen notwendige Auslegungsverhältnisse κ, Tafel 8 führt optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} auf und Tafel 9 beinhaltet optimale Auslegungsverhältnisse κ_h. Die Tafeln 10, 11 und 12 geben Gleichungsnummern an, und zwar bei Auslegung mit κ_{best} Tafel 10 für λ-Funktionen und Vergleichszahlen α, Tafel 11 für maximale absolute bezogene hydrostatischen Leistungen sowie bei Auslegung mit κ_h Tafel 12 für λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h.

Tafel 7 Entscheidungs-Auslegungsverhältnisse κ abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Stellverhältnis $\ddot{y}$

$\kappa_{g1} = \frac{2\,\ddot{y}}{\ddot{y}+1}$	κ_3 nach Bild 25 bzw. Gl. (272)
$\kappa_{g2} = \frac{\ddot{y}+\ddot{y}^{\nu+1}}{1+\ddot{y}^{\nu+1}}$	κ_4 nach Bild 26 bzw. Gl. (295)
$\kappa_{g3} = \frac{\nu}{\nu+1}\ddot{y}$	κ_5 nach Bild 27 bez. Gl. (323) bis (326)
κ_{g4} nach Bild 15 bzw. Gl. (62)	

Tafel 8 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} für maximale Verdrängungsvolumen-Summe

ν	Bedingungen	κ_{1best}	κ_{2best}
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung	$\kappa_{g1} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g2}$	$\kappa_{3} \leq \kappa_{g1}$: κ_{g1}
		vorzugsweise:	$\kappa_{g1} \leq \kappa_{3} \leq \kappa_{g2}$: κ_{3}
	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \geq 2$	$\kappa_{1best} = \kappa_h = \kappa_{g2}$	$\kappa_{3} > \kappa_{g2}$: κ_{g2}
< 0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	2	$\kappa_{4} \leq \kappa_{g2}$: κ_{g2}
			$\kappa_{g2} \leq \kappa_{4} \leq 2$: κ_{4}
			$\kappa_{4} > 2$: κ_{2}
> 0	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$	$\kappa_{g2} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g1}$	$\kappa_{5} \leq \kappa_{g2}$: κ_{g2}
		vorzugsweise:	$\kappa_{g2} \leq \kappa_{5} \leq \kappa_{g1}$: κ_{5}
		$\kappa_{1best} = \kappa_{g2}$	$\kappa_{5} > \kappa_{g1}$: κ_{g1}
	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$	$\kappa_{g4} \leq \kappa_{1best} \leq \kappa_{g1}$	$\kappa_{5} \leq \kappa_{g4}$: κ_{g4}
		vorzugsweise:	$\kappa_{g4} \leq \kappa_{5} \leq \kappa_{g1}$: κ_{5}
		$\kappa_{1best} = \kappa_{g4}$	$\kappa_{5} > \kappa_{g1}$: κ_{g1}

Tafel 9 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_h für minimale absolute bezogene hydrostatischen Leistungen

$$\min |P_h/P_{1+}|_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa_h}$$

Bedingungen	κ_h
$\kappa_{g2} \geq \kappa_{g3}$	κ_{g2}
$\kappa_{g4} \leq \kappa_{g3}$	κ_{g4}

Tafel 10 λ-Funktionen und Vergleichszahlen α bei Auslegung mit κ_{best} auf minimale Verdrängungsvolumen-Summe

ν	Bedingungen	Gleichungsnummern							
		λ_{a1best}	λ_{b1best}	λ_{1min}	α_1	λ_{a2best}	λ_{b2best}	λ_{2min}	α_2
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \geq 2$	261	262	263	264	276	277	278	279
<0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	286	287	288	289	299	3oo	3o1	3o2
>0	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$	312	313	314	315	32o	331	332	333
	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$	312	313	314	315	33o	331	332	333

Tafel 11 Maximale absolute bezogene hydrostatische Leistungen $|P_h/P_{1+}|_{max}$ bei Auslegung mit κ_{best} auf minimale Verdrängungsvolumen-Summe

Bedingungen	$\nu \leq 0$; $\kappa_{best} \leq \kappa_{g2}$ oder $\nu > 0$; $\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$ $\kappa_{best} \leq \kappa_{g2}$	$\nu \leq 0$; $\kappa_{best} \geq \kappa_{g2}$ oder $\nu > 0$; $\kappa_{best} \geq \kappa_{g3}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g2}$ oder $\nu > 0$; $\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g4}$	$\nu > 0$; $\kappa_{best} \leq \kappa_{g3}$ $\kappa_{best} \leq \kappa_{g4}$
Gleichungs-nummern	246	247	248

Tafel 12 λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h bei Auslegung mit κ_h auf das Minimum der maximalen absoluten bezogenen hydrostatischen Leistung $\min |P_h/P_{1+}|_{max}$

ν	Bedingungen		Gleichungsnummern λ_{ah}	λ_{b1h}	λ_{1h}	λ_{b2}	λ_{2h}
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung	$\kappa_h \leq \kappa_{g1}$	252	254	256	265	268
	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \geq 2$	$\kappa_{g1} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g2}$	253	254	257	266	269
		$\kappa_h \geq \kappa_{g2}$	253	255	258	267	27o
<0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \leq 2$	$\kappa_h \leq \kappa_{g2}$	28o	281	283	29o	292
		$\kappa_{g2} \leq \kappa_h \leq 2$	28o	282	284	291	293
>0	$\kappa_h \geq \kappa_{g3}$	$\kappa_h \leq \kappa_{g2}$	3o3	3o5	3o7	316	319
		$\kappa_{g2} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g1}$	3o3	3o6	3o8	317	32o
		$\kappa_h \geq \kappa_{g1}$	3o4	3o6	3o9	32o	321
	$\kappa \leq \kappa_{g3}$	$\kappa_h \leq \kappa_{g4}$	3o3	334	335	338	339
		$\kappa_{g4} \leq \kappa_h \leq \kappa_{g1}$	3o4	3o6	3o8	317	32o
		$\kappa_h \geq \kappa_{g1}$	3o4	3o6	3o9	318	321

α_{1h} nach Gl. (96), α_{2h} nach Gl. (97) mit λ_1 nach Gl. (26), λ_2 nach Gl. (27) für $\nu \leq 0$ und mit $\lambda_1 = \lambda_2$ nach Gl. (28) für $\nu > 0$

Die Auswertungen der zu den Tafeln 1 bis 6 gehörenden Beziehungen sind in den Bildern dargestellt, die der Band II geordnet nach den Arbeitsmaschinenexponenten ν: -1, 0, 1, 2 enthält.

8. Hydrostatisches Koppelgetriebe C

Bild 9 stellt das Koppelgetriebe C symbolisch dar. Zur Kennzeichnung des Schaltzustandes mit Kupplung A führt man den Index A und mit Kupplung B den Index B ein.

Die Übersetzungen i_{efA} und i_{efB} sind so bemessen, daß beim Wechseln des Schaltzustandes synchrone Drehzahlen vorliegen. Die Umschaltung der Verdrängermaschine mit der Welle b von der Abtriebswelle 2 auf die Antriebswelle 1 oder umgekehrt geschieht bei stehender Welle r des Hauptgetriebes. Im Umschaltzustand hat die Verdrängermaschine mit der Welle a endliches und die mit der Welle b kein Verdrängungsvolumen. Die Welle r stützt sich dann also über das Vorgelege mit den Rädern bzw. Wellen g, k über eine Ölsäule ab. Die Welle b braucht kein Drehmoment aufzunehmen, d.h. die Umschaltung erfolgt drehmomentfrei und synchron. Es gelten die Bedingungen

Schaltstellung A: $|i_{12}| \geq |i_{1q}|$ (343)

Schaltstellung B: $|i_{12}| \leq |i_{1q}|$ (344)

und ferner

$$i_{12\Delta} = i_{12\Delta A} \quad (345)$$

$$i_{12+A} = i_{1q} = i_{12\Delta B} \quad (346)$$

$$i_{12+} = i_{12+B} \quad (347)$$

8.1. Maximale Drehmomente der Verdrängermaschinen

Nach Gl. (36) ist

$$|T_{aA}| = |T_{1A}| \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \left|1 - \frac{i_{1q}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{348}$$

und mit

$$|T_{1A}|_{max} = \frac{|T_{2+A}|}{|i_{1q}|} \tag{349}$$

sowie mit Gl. (13) und mit $i_{1q}/i_{12+} = \kappa$

$$|T_{2+A}| = |T_{2+}| \left(\frac{i_{12+}}{i_{1q}}\right)^{\nu} \tag{35o}$$

$$|T_{aA}|_{max} = \frac{|T_{2+}|}{|i_{12+}|} \frac{|\omega_1|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \frac{1}{\kappa^{\nu}} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{351}$$

Mit Gl. (29) wird

$$\lambda_{aA} = \frac{1}{\kappa^{\nu}} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{352}$$

und mit Gl. (196)

$$\lambda_{aB} = \left(\frac{i_{12+}}{i_{12B}}\right)^{\nu}_{max} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{353}$$

Es folgen für

$$\nu \leq 0: \quad \left(\frac{i_{12+}}{i_{12B}}\right)^{\nu}_{max} = \frac{1}{\kappa^{\nu}} \tag{354}$$

$$\nu \geq 0: \quad \left(\frac{i_{12+}}{i_{12B}}\right)^{\nu}_{max} = 1 \tag{355}$$

mit

$$\lambda_{aB} \geq \lambda_{aA} \tag{356}$$

wird maßgebend

$$\lambda_a = \lambda_{aB} \tag{357}$$

Für den Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$ erhält man

$$\lambda_a = \frac{1}{\kappa^{\nu}} \left|\frac{1}{\kappa} - \frac{i_{12+}}{i_{12}}\right|_{max} \tag{358}$$

und im Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung mit den Gl. (198) und (199)

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{gl}: \quad \lambda_a = \frac{1}{\kappa^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{359}$$

$$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{gl}: \quad \lambda_a = \frac{1}{\kappa^{\nu}} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{360}$$

sowie im Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung mit den Gl. (202) und (203)

$$\nu \leq 0;\ \kappa \leq 2: \quad \lambda_a = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} \tag{361}$$

Für $\kappa \geq \kappa_{gl} = 2$ bleibt hier Gl. (360) gültig. Die Möglichkeit des Anfahrens der Arbeitsmaschine aus dem Stillstand bei laufender Kraftmaschine wirkt sich wie bei

den Koppelgetrieben A und B auch beim Getriebe C nur bei $\kappa < 2$ auf das maximale Drehmoment der Verdrängermaschine mit der Welle a aus.

Für Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$ bleiben die Gl. (2o5) und (2o6) vom Koppelgetriebe B gültig.

Ferner gelten nach Bild 9 die Beziehungen

$$T_{bA}\, i_{efA} + T_{1A}\, i_{1q} + T_{2A} = 0 \tag{362}$$

$$T_{1B} + \frac{T_{2B}}{i_{1q}} + T_{bB}\, i_{efB} = 0 \tag{363}$$

mit

$$|i_{efA}| = \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_{2A}|_{max}} = \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_1|_{max}} |i_{1q}| = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_1|_{max}} \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_a|_{max}} |i_{1q}| \tag{364}$$

$$|i_{efB}| = \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_1|_{max}} = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_1|_{max}} \frac{|\omega_b|_{max}}{|\omega_a|_{max}} \tag{365}$$

Mit den Gl. (13), (29) und (49) und mit $\kappa = i_{1q}/i_{12+}$ erhält man

$$\lambda_b = \lambda_{bA} = \lambda_{bB} = \frac{|\omega_a|_{max}}{|\omega_b|_{max}} \left| \frac{1}{\kappa} \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu} - \left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+1} \right|_{max} \tag{366}$$

Gl. (366) ist mit Gl. (211) vom Koppelgetriebe B identisch. Dies bedeutet, daß auch für das Koppelgetriebe C die Gl. (211) bis (225) und (232) bis (237) vom Koppelgetriebe B zutreffen. Lediglich für $\nu \leq 0$ folgen neue Beziehungen für λ_{b2}.

Mit den Gl. (22), (223), (224), (359), (36o) und (361) gelten bedingungsgemäß

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$
$\kappa \leq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{\kappa^{\nu}}{f^{\nu}}}\ \frac{f-\kappa}{\kappa\, f^{\nu+1}} \tag{367}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$
$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\frac{\kappa^{\nu+1}}{\kappa-1}\ \left(\frac{1}{\kappa\, f^{\nu}} - \frac{1}{f^{\nu+1}}\right)^3} \tag{368}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$
$\kappa \geq \kappa_{g1}$

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\kappa^{\nu}}\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{369}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \leq \kappa_{g2}$
$\kappa \leq 2$
Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \sqrt{\kappa^{\nu+1}\ \left(\frac{1}{\kappa\, f^{\nu}} - \frac{1}{f^{\nu+1}}\right)^3} \tag{37o}$$

$\nu \leq 0;\ \kappa \geq \kappa_{g2}$
$\kappa \leq 2$
Drehmomentbegrenzung für Anfahren

$$\lambda_{b2} = \frac{1}{\kappa}\sqrt{\kappa^{\nu}\ (\kappa-1)^3} \tag{371}$$

8.2. Maximale Leistungen der Verdrängermaschinen

Es folgen aus Gl. (245)

$$\left|\frac{P_{hB}}{P_{1+}}\right|_{max} = \left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12B}}\right)^{\nu+1} - \frac{1}{\kappa}\left(\frac{i_{12+}}{i_{12B}}\right)^{\nu}\right|_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{372}$$

und aus Gl. (7)

$$\left|\frac{P_{hA}}{P_{1+}}\right|_{max} = \left|\left(\frac{i_{12+}}{i_{12A}}\right)^{\nu+1} - \kappa\left(\frac{i_{12+}}{i_{12}}\right)^{\nu+2}\right|_{max} \tag{373}$$

$|P_{hA}/P_{1+}|_{max}$ kann an der Stelle $i_{12+}/i_{12A} = 1/\varphi$ oder an der Stelle i_{12+}/i_{12} nach Gl. (81) liegen. Die Entscheidungshilfe gibt κ_{g6} nach Gl. (83). Für $|P_{hA}/P_{1+}|_{max}$ treffen bei $\kappa \geq \kappa_{g6}$ Gl. (86) und bei $\kappa \leq \kappa_{g6}$ Gl. (87) zu.

Ob für $|P_h/P_{1+}|_{max}$ Gl. (372) oder Gl. (373) in Frage kommt, folgt aus den Bedingungen

$$\left|1 - \frac{1}{\kappa_{g8}}\right| = \left|\frac{1}{\varphi^{\nu+1}} - \kappa_{g8}\frac{1}{\varphi^{\nu+2}}\right| \tag{374}$$

mit

$$\kappa_{g8} = -\frac{\varphi^{\nu+2} - \varphi}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varphi^{\nu+2} - \varphi}{2}\right)^2 + \varphi^{\nu+2}} \tag{375}$$

und

$$\left|1 - \frac{1}{\kappa_{g9}}\right| = \left|\left[\frac{\nu+1}{(\nu+2)\,\kappa_{g9}}\right]^{\nu+1} - \frac{1}{\kappa_{g9}}\left[\frac{\nu+1}{(\nu+2)\,\kappa_{g9}}\right]^{\nu}\right| \tag{376}$$

mit

$$\kappa_{g9}^{\nu+1} - \kappa_{g9}^{\nu} - \frac{(\nu+1)^{\nu+1}}{(\nu+2)^{\nu+2}} = 0 \qquad (377)$$

Die Auswertung von κ_{g8} zeigt Bild 28 und von κ_{g9} Bild 29.

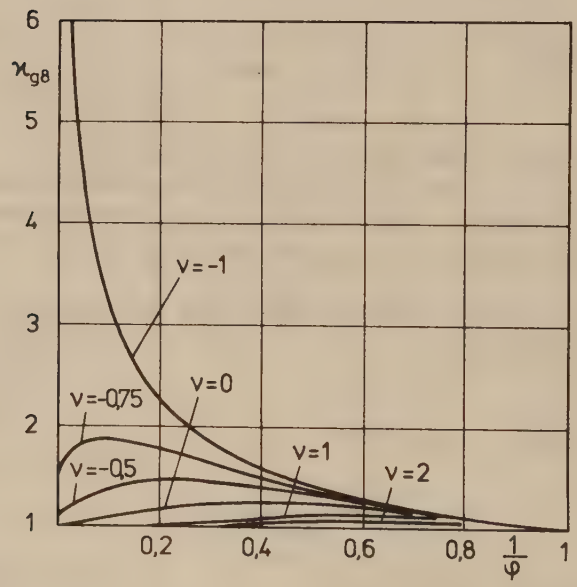

Bild 28 Grenzauslegungsverhältnis κ_{g8} abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

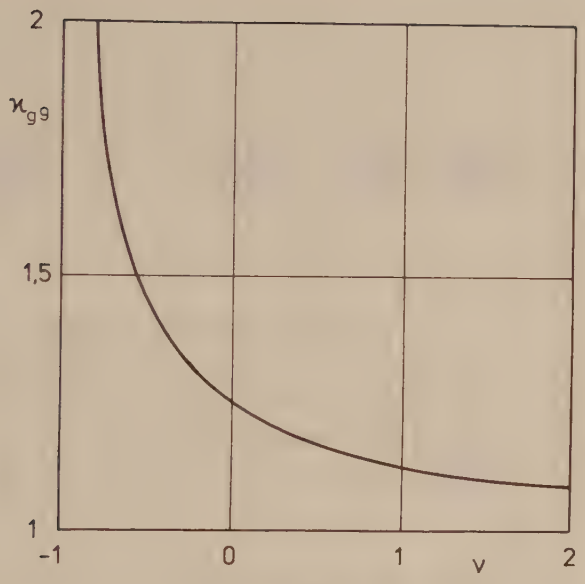

Bild 29 Grenzauslegungsverhältnis κ_{g9} abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν

Beim Umschalten ist die hydrostatische Leistung Null und die Antriebsleistung fließt als mechanische Leistung zum Abtrieb. In allen anderen Stellungen liegt Leistungsteilung vor. Der hydrostatische und der mechanische Leistungsfluß sind dann stets positiv und jeweils kleiner als die Antriebsleistung. Es gibt keine Blindleistung.

Für die maximalen bezogenen hydrostatischen Leistungen bei optimalen Auslegungsverhältnissen κ_{best} gelten bedingungsgemäß folgende Beziehungen.

$$\left.\begin{array}{l} \kappa_{best} \geq \kappa_{g6} \\ \kappa_{best} \geq \kappa_{g8} \\ \text{oder} \\ \kappa_{best} \leq \kappa_{g6} \\ \kappa_{best} \geq \kappa_{g9} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right| = \frac{P_h}{P_{1+}} = 1 - \frac{1}{\kappa_{best}} \qquad (378)$$

$$\left.\begin{array}{l} \kappa_{best} \geq \kappa_{g6} \\ \kappa_{best} \leq \kappa_{g8} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right| = \frac{P_h}{P_{1+}} \quad \text{nach Gl. (86)}$$

$$\left.\begin{array}{l} \kappa_{best} \leq \kappa_{g6} \\ \kappa_{best} \leq \kappa_{g9} \end{array}\right\} \quad \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right| = \frac{P_h}{P_{1+}} \quad \text{nach Gl. (87)}$$

8.3. Optimale Auslegungsverhältnisse

Das Minimum der maximalen bezogenen hydrostatischen Leistungen erhält man an der Stelle $i_{12+}/i_{12} = 1$ mit

$$\min \left|\frac{P_h}{P_{1+}}\right|_{max} = \min \left(\frac{P_h}{P_{1+}}\right)_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa} \qquad (379)$$

wenn entweder Gl. (374) oder aber Gl. (376) erfüllt ist und somit

$$\kappa_h = \kappa_{g8} \geq \kappa_{g6} \qquad (380)$$

oder

$$\kappa_h = \kappa_{g9} \leq \kappa_{g6} \tag{381}$$

Wie bei den Koppelgetrieben A und B gelten auch beim Koppelgetriebe C die Bilder 17 bis 19 sowie die Gl. (91) bis (97).

8.3.1. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu \leq 0$

Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung für $\nu \leq 0$

Für κ_{gu}, κ_v und κ_{gw} treffen die Gl. (98), (99) und (100) zu. Mit den Gl. (359), (360), (223) und (224) folgen

$$\lambda_{ua} = \frac{1}{\kappa^\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\gamma}\right) \tag{382}$$

$$\lambda_{va} = \lambda_{wa} = \frac{1}{\kappa^\nu} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \tag{383}$$

$\lambda_{ub1} = \lambda_{vb1}$ nach Gl. (254)

λ_{wb1} nach Gl. (255)

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\gamma}\right) \left(\frac{1}{\kappa^\nu} + \frac{1}{\gamma^\nu}\right) \tag{384}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \frac{1}{\kappa^\nu} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) + \frac{1}{\gamma^\nu} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\gamma}\right) \tag{385}$$

$$\lambda_{w1} = \lambda_{wa} + \lambda_{wb1} = \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \left(1 + \frac{1}{\kappa^\nu}\right) \tag{386}$$

Während mit wachsendem κ die Funktion λ_{ul} fällt und in ihrem Gültigkeitsbereich die Funktion λ_{wl} steigt, weist λ_{vl} an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_6$ ein Minimum auf. Die Bedingung

$$\frac{d\,\lambda_{vl}}{d\,\kappa} = 0 \tag{387}$$

liefert

$$\kappa_6^{\nu} + \nu\,\varphi^{\nu}\,\kappa_6 - (\kappa+1)\varphi^{\nu} = 0 \tag{388}$$

Gl. (388) ist im Bild 3o dargestellt.

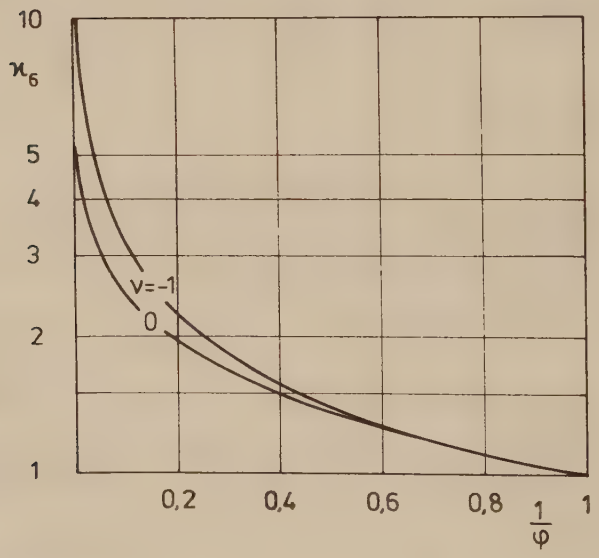

Bild 3o Auslegungsverhältnis κ_6 abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und vom Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

Die Bilder 17 bis 19 führen zu den Ergebnissen

$$\kappa_6 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{1best} = \kappa_{g1} \tag{389}$$

$$\kappa_{g1} \leq \kappa_6 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{1best} = \kappa_6 \tag{390}$$

$$\kappa_6 \geq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{391}$$

und mit den Gl. (383) und (254) werden

$$\lambda_{albest} = \frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu}} \left(1 - \frac{1}{\kappa_{1best}}\right) \tag{392}$$

$$\lambda_{blbest} = \frac{1}{\vartheta^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{1best}} - \frac{1}{\vartheta}\right) \tag{393}$$

$$\lambda_{1min} = \frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu}} \left(1 - \frac{1}{\kappa_{1best}}\right) + \frac{1}{\vartheta^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{1best}} - \frac{1}{\vartheta}\right) \tag{394}$$

sowie mit Gl. (26) die Vergleichszahl

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{min}}{\lambda_1} = \frac{\vartheta^{\nu}}{1+\vartheta^{\nu}} \frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu}} \left(1 - \frac{1}{\kappa_{1best}}\right) + \frac{1}{\vartheta^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{1best}} - \frac{1}{\vartheta}\right) \tag{395}$$

Mit den Gl. (382), (383), (367), (368) und (369) folgen

$$\lambda_{ub2} = \sqrt{\frac{\kappa^{\nu}}{\vartheta^{\nu}}} \frac{\vartheta - \kappa}{\kappa \vartheta^{\nu+1}} \tag{396}$$

$$\lambda_{vb2} = \sqrt{\frac{\kappa^{\nu+1}}{\kappa-1}} \left(\frac{1}{\kappa \vartheta^{\nu}} - \frac{1}{\vartheta^{\nu+1}}\right)^3 \tag{397}$$

$$\lambda_{wb2} = \sqrt{\kappa^{\nu}}\,(1 - \frac{1}{\kappa}) \tag{398}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{\varphi - \kappa}{\varphi\,\kappa^{\nu+1}}\,(1 + \sqrt{\frac{\kappa^{\nu}}{\varphi^{\nu}}}) \tag{399}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \frac{\kappa-1}{\kappa^{\nu+1}} + \sqrt{\frac{\kappa^{\nu+1}}{\kappa-1}\,(\frac{1}{\kappa\,\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}})^3} \tag{400}$$

$$\lambda_{w2} = \lambda_{wa} = (1 - \frac{1}{\kappa})\,(\frac{1}{\kappa^{\nu}} + \sqrt{\kappa^{\nu}}) \tag{401}$$

Mit zunehmendem κ fällt λ_{u2} und steigt in ihrem Gültigkeitsbereich die Funktion λ_{w2}. Hingegen hat λ_{v2} an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_7$ ein Minimum. Mit

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{402}$$

wird

$$0 = \frac{\nu+1}{\kappa_7^{\nu+2}} - \frac{\nu}{\kappa_7^{\nu+1}} + \frac{(\frac{1}{\kappa_7\,\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}})^3 \left[(\kappa_7-1)\,(\nu+1)\,\kappa_7^{\nu} - \kappa_7^{\nu+1}\right] - 3\,(\kappa_7-1)\,\frac{\kappa_7^{\nu-1}}{\varphi^{\nu}}\,(\frac{1}{\kappa_7\,\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}})^2}{2\sqrt{\frac{\kappa_7^{\nu+1}}{\kappa_7-1}\,(\frac{1}{\kappa_7\,\varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}})^3}\,(\kappa_7-1)^2} \tag{403}$$

Bild 31 gibt Gl. (403) grafisch wieder.

Mit den Bildern 17 bis 19 erhält man bedingungsgemäß die Ergebnisse

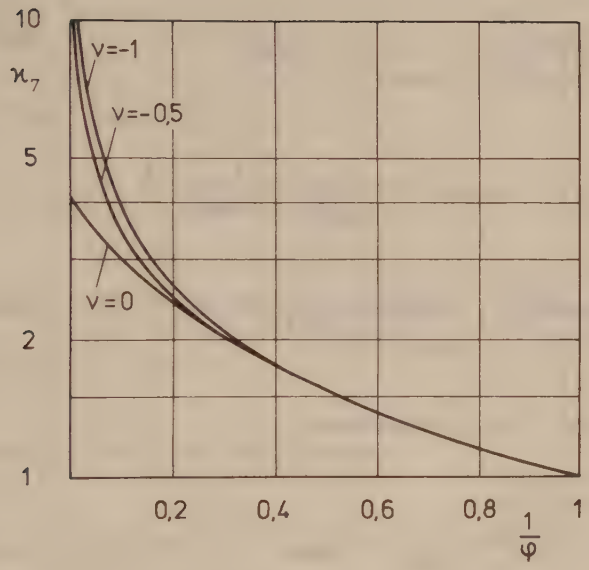

Bild 31 Auslegungsverhältnis κ_7 abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Reziprokwert des Stellverhältnisses φ

$$\kappa_7 \leq \kappa_{g1} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g1} \tag{4o4}$$

$$\kappa_{g1} \leq \kappa_7 \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_7 \tag{4o5}$$

$$\kappa_7 \geq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{4o6}$$

und mit den Gl. (383) und (397)

$$\lambda_{a2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{4o7}$$

$$\lambda_{b2best} = \sqrt{\frac{\kappa_{2best}^{\nu+1}}{\kappa_{2best}^{-1}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}\, \vartheta^{\nu}} - \frac{1}{\vartheta^{\nu+1}}\right)^3} \qquad (4o8)$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\vartheta}\right) +$$

$$+ \sqrt{\frac{\kappa_{2best}^{\nu+1}}{\kappa_{2best}^{-1}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}\, \vartheta^{\nu}} - \frac{1}{\vartheta^{\nu+1}}\right)^3} \qquad (4o9)$$

und mit Gl. (27) die Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\vartheta^{3\nu}}}{1+\sqrt{\vartheta^{3\nu}}} \left[\frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}} - \frac{1}{\vartheta}\right) +\right.$$

$$\left. + \sqrt{\frac{\kappa_{2best}^{\nu+1}}{\kappa_{2best}^{-1}} \left(\frac{1}{\kappa_{2best}\, \vartheta^{\nu}} - \frac{1}{\vartheta^{\nu+1}}\right)^3}\right] \qquad (41o)$$

Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung für $\nu < 0$

Unter Berücksichtigung der Gl. (36o) und (361) bleiben für $\kappa_{best} \geq 2$ die für den Stellbereich ohne Drehmomentbegrenzung ermittelten Gl. (382) bis (41o) gültig.

Für κ_{gu} und κ_{gw} treffen die Gl. (131) und (132) zu. Mit den Gl. (361), (223) und (224) werden

$$\lambda_{ua} = \lambda_{va} = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} \qquad (411)$$

λ_{ub1} nach Gl. (281)

λ_{vb1} nach Gl. (282)

$$\lambda_{u1} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub1} = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} + \frac{1}{\varphi^{\nu}} \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\varphi}\right) \tag{412}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_{va} + \lambda_{vb1} = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} + 1 - \frac{1}{\kappa} \tag{413}$$

λ_{u1} fällt und λ_{v1} steigt mit zunehmendem κ. Somit

$$\kappa_{1best} = \kappa_{g2} \tag{414}$$

Mit den Gl. (411) und (282) werden

$$\lambda_{albest} = \frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu+1}} \tag{415}$$

$$\lambda_{blbest} = 1 - \frac{1}{\kappa_{1best}} \tag{416}$$

$$\lambda_{1min} = \lambda_{albest} + \lambda_{blbest} = \frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu+1}} + 1 - \frac{1}{\kappa_{1best}} \tag{417}$$

und mit Gl. (26) die Vergleichszahl

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{1min}}{\lambda_1} = \frac{\varphi^{\nu}}{1+\varphi^{\nu}} \left[\frac{1}{\kappa_{1best}^{\nu+1}} + 1 - \frac{1}{\kappa_{1best}} \right] \tag{418}$$

Ferner erhält man mit den Gl. (411), (37o) und (371)

$$\lambda_{ub2} = \sqrt{\kappa^{\nu+1} \left(\frac{1}{\kappa \varphi^{\nu}} - \frac{1}{\varphi^{\nu+1}}\right)^3} \tag{419}$$

$$\lambda_{vb2} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\kappa^{\nu} (\kappa-1)^3} \tag{42o}$$

$$\lambda_{u2} = \lambda_{ua} + \lambda_{ub2} = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} + \sqrt{\kappa^{\nu+1} \left(\frac{1}{\kappa\, y^{\nu}} - \frac{1}{y^{\nu+1}}\right)^3} \tag{421}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_{va} + \lambda_{vb2} = \frac{1}{\kappa^{\nu+1}} + \frac{1}{\kappa} \sqrt{\kappa^{\nu} (\kappa-1)^3} \tag{422}$$

Die Funktion λ_{u2} fällt mit zunehmenden κ, während die Funktion λ_{v2} an der Stelle $\kappa = \kappa_v = \kappa_8$ ein Minimum aufweist. κ_8 erhält man aus der Bedingung

$$\frac{d\,\lambda_{v2}}{d\,\kappa} = 0 \tag{423}$$

$$0 = -(\nu+1)\, \frac{1}{\kappa_8^{\nu+2}} + \frac{\nu \kappa_8^{\nu-1} (\kappa_8-1)^3 + \kappa_8^{\nu}\, 3(\kappa_8-1)^2}{\kappa_8^2 \sqrt{\kappa_8^{\nu} (\kappa_8-1)^3}} -$$

$$- \frac{1}{\kappa_8^2} \sqrt{\kappa_8^{\nu} (\kappa_8-1)^3} \tag{424}$$

Bild 32 zeigt die ausgewerte Gl. (424).

Bedingungsgemäß kommt man zu den Ergebnissen

$$\kappa_g \leq \kappa_{g2} \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_{g2} \tag{425}$$

$$\kappa_{g2} \leq \kappa_8 \leq 2 \quad : \quad \kappa_{2best} = \kappa_8 \tag{426}$$

$$\kappa_g \geq 2 \quad : \quad \kappa_{2best} = 2 \tag{427}$$

und mit den Gl. (411) und (42o) zu

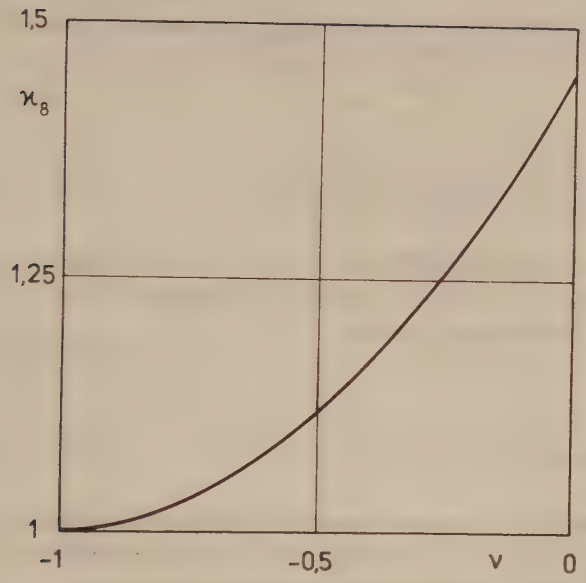

Bild 32 Auslegungsverhältnis κ_8 abhängig vom Arbeitsmaschinenexponenten ν

$$\lambda_{a2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu+1}} \tag{428}$$

$$\lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\kappa_{2best}^{\nu} (\kappa_{2best} - 1)^3} \tag{429}$$

$$\lambda_{2min} = \lambda_{a2best} + \lambda_{b2best} = \frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu+1}} + \frac{1}{\kappa_{2best}} \sqrt{\kappa_{2best}^{\nu} (\kappa_{2best}-1)^3}$$

und mit Gl. (27) zu der Vergleichszahl

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{2min}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\varphi^{3\nu}}}{1+\sqrt{\varphi^{3\nu}}}\left[\frac{1}{\kappa_{2best}^{\nu+1}} + \frac{1}{\kappa_{2best}}\sqrt{\kappa_{2best}^{\nu}\,(\kappa_{2best}^{-1})^3}\right] \tag{431}$$

8.3.2. Arbeitsmaschinenexponenten $\nu > 0$

Hier sind bei den Koppelgetrieben C und B die Funktionen λ_a und λ_b gleich. Deshalb bleiben die im Abschnitt 7.3.2. aufgestellten Beziehungen gültig.

8.4. Zusammenfassung

Tafel 13 enthält für Entscheidungen notwendige Auslegungsverhältnisse κ, Tafel 14 führt optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} auf und Tafel 15 beinhaltet optimale Auslegungsverhältnisse κ_h. Die Tafeln 16, 17 und 18 geben Gleichungsnummern an, und zwar bei Auslegung mit κ_{best} Tafel 16 für λ-Funktionen und Vergleichszahlen α, Tafel 17 für maximale bezogene hydrostatischen Leistungen sowie bei Auslegung mit κ_h Tafel 18 für λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h.

Tafel 13 Entscheidungs-Auslegungsverhältnisse κ abhängig bom Arbeitsmaschinenexponenten ν und Stellverhältnis φ

$\kappa_{g1} = \frac{2\varphi}{\varphi+1}$	κ_{g9} nach Bild 29 bzw. nach Gl. (377)
$\kappa_{g2} = \frac{\varphi+\varphi^{\nu+1}}{1+\varphi^{\nu+1}}$	κ_5 nach Bild 27 bzw. nach Gl. (323) bis (326)
$\kappa_{g3} = \frac{\nu}{\nu+1}\varphi$	κ_6 nach Bild 3o bzw. Gl. (388)
κ_{g4} nach Bild 15 bzw. Gl. (62)	κ_7 nach Bild 31 bzw. Gl. (4o3)
$\kappa_{g6} = \frac{\nu+1}{\nu+2}\varphi$	κ_8 nach Bild 32 bzw. Gl. (424)
κ_{g8} nach Bild 28 Gl. (375)	

Tafel 14 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_{best} für minimale Verdrängungsvolumen-Summe

φ	Bedingungen	κ_{1best}	κ_{2best}
≤ 0	ohne Drehmoment-begrenzung	$\kappa_6 \leq \kappa_{g1}$: κ_{g1}	$\kappa_7 \leq \kappa_{g1}$: κ_{g1}
	mit Drehmoment-begrenzung bei $\kappa_{best} \geq 2$	$\kappa_{g1} \leq \kappa_6 \leq \kappa_{g2}$: κ_6	$\kappa_{g1} \leq \kappa_7 \leq \kappa_{g2}$: κ_7
		$\kappa_6 \geq \kappa_{g2}$: κ_{g2}	$\kappa_7 \geq \kappa_{g2}$: κ_{g2}
<0	mit Drehmoment-begrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	κ_{g2}	$\kappa_8 \leq \kappa_{g2}$: κ_{g2}
			$\kappa_{g2} \leq \kappa_8 \leq 2$: κ_8
			$\kappa_8 \geq 2$: 2
>0	wie in Tafel 8 angegeben		

Tafel 15 Optimale Auslegungsverhältnisse κ_h für maximale bezogene hydrostatischen Leistungen $\min (P_h/P_{1+})_{max} = 1 - \frac{1}{\kappa_h}$

Bedingungen	κ_h
$\kappa_{g8} \geq \kappa_{g6}$	κ_{g8}
$\kappa_{g9} \leq \kappa_{g6}$	κ_{g9}

Tafel 16 λ-Funktionen und Vergleichszahlen α bei Auslegung mit κ_{best} auf minimale Verdrängungsvolumen-Summe

ν	Bedingungen	Gleichungsnummern λ_{a1best}	λ_{b1best}	λ_{1min}	α_1	λ_{a2best}	λ_{b2best}	λ_{2min}	α_2
≤0	ohne Drehmomentbegrenzung mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	392	393	394	395	4o7	4o8	4o9	41o
<0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_{best} \leq 2$	415	416	417	418	428	429	43o	431
>0	wie in Tafel 1o angegeben								

Tafel 17 Maximale bezogene hydrostatische Leistungen $(P_h/P_{l+})_{max}$ bei Auslegung mit κ_{best} auf maximale Verdrängungsvolumen-Summe

Bedingungen	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g8}$ oder $\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \geq \kappa_{g9}$	$\kappa_{best} \geq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \leq \kappa_{g8}$	$\kappa_{best} \leq \kappa_{g6}$ $\kappa_{best} \leq \kappa_{g9}$
Gleichungs-nummern	378	86	87

Tafel 18 λ_h-Funktionen und Vergleichszahlen α_h bei Auslegung mit κ_h auf das Minimum der maximalen bezogenen hydrostatischen Leistung $\min (P_h/P_{1+})_{max}$

ν	Bedingungen		Gleichungenummern λ_{ah}	λ_{b1h}	λ_{1h}	λ_{b2h}	λ_{2h}
≤ 0	ohne Drehmomentbegrenzung	$\kappa_h \leq \kappa_{g1}$	382	254	384	396	399
	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \geq 2$	$\kappa_{g1} \leq \kappa_g \leq \kappa_{g2}$	383	254	385	397	4oo
		$\kappa_h \geq \kappa_{g2}$	383	255	386	398	4o1
< 0	mit Drehmomentbegrenzung bei $\kappa_h \leq 2$	$\kappa_h \leq \kappa_{g2}$	411	281	412	419	421
		$\kappa_{g2} \leq \kappa_h \leq 2$	411	282	413	42o	422
> 0	wie in Tafel 12 angegeben						

α_{1h} nach Gl. (96); α_{2h} nach Gl. (97) mit λ_1 nach Gl. (26) λ_2 nach Gl. (27) für $\nu \leq 0$ und mit $\lambda_1 = \lambda_2$ nach Gl. (28) für $\nu > 0$

Die Auswertungen der zu den Tafeln 13 bis 18 gehörenden Beziehungen sind in den Bildern dargestellt, die der Band II geordnet nach den Arbeitsmaschinenexponenten ν: -1, 0, 1, 2 enthält.

9. Vergleiche

Die Bilder 35 bis 54 im Band II ermöglichen für die im allgemeinen vorkommenden Arbeitsmaschinenexponenten ν: -1, 0, 1, 2 einen Baugrößen- und Leistungsvergleich der hydrostatischen Koppelgetriebe A, B, C sowohl untereinander als auch jeweils mit einem hydrostatischen Standgetriebe.

Die Vergleichszahlen α_1 sind in den Bildern 35 bis 38 dargestellt. Gegenüber dem hydrostatischen Standgetriebe benötigt man mit abnehmendem Stellverhältnis φ zunehmend kleinere Verdrängungsvolumen. Beim Getriebe C und bei $\nu = -1$ ist diese Tendenz allerdings erst ab $\varphi \approx 7$ vorhanden, wo die Kurve α_1 ein Maximum hat.

Bei $\nu = -1$ bauen die Getriebe A und B gleich groß. Im Vergleich dazu kommt man mit zunehmendem Stellverhältnis beim Koppelgetriebe C im steigenden Maße mit kleineren Verdrängungsvolumen aus.

Bei $\nu \geq 0$ nach Bild 36 bis 38 fallen die α_1-Kurven der Getriebe B und C zusammen. Hier lohnt sich der Aufwand des Umschaltens nicht. Mit zunehmenden φ wächst der Vorteil des Getriebes B gegenüber dem Getriebe A.

Eine Auslegung für das Anfahren der Arbeitsmaschinen aus dem Stillstand bei laufender Kraftmaschine, d.h. ein Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung wirkt sich bei $\nu = -1$ nach Bild 35 erst bei Stellverhältnissen $\varphi < 3$ aus. Mit abnehmendem φ wächst dann die notwendige Zunahme der Verdrängungsvolumen.

Die Bilder 39 bis 42 zeigen die Vergleichszahlen α_2. Bei $\nu = -1$ haben auch die Kurven für die Getriebe A und B ein Maximum. Sonst weisen die α_2-Kurven die gleiche Tendenz wie die α_1-Kurven auf. Bei $\nu = -1$ liegen die α_2-Kurven aber beachtlich niedriger, während bei $\nu = 0$ kein und bei $\nu > 0$

nur ein geringer Unterschied vorhanden ist. Bei $\nu = -1$ wirkt sich der Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung auch erst ab $\varphi < 3$ aus, und zwar zunehmend mit abnehmendem φ.

Die Vergleichszahlen α_{1h} sind in den Bildern 43 bis 46 dargestellt. Bei $\nu = -1$ sind sie identisch mit den Vergleichszahlen α_1. Im Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung ergeben sich allerdings hier höhere Werte. Auch bei $\nu \geq 0$ fallen für das Getriebe B die α_{1h}-Kurven mit den α_1-Kurven zusammen. Für die Koppelgetriebe A und C stellen sich hingegen ungünstigere Werte ein.

Die Bilder 47 bis 5o enthalten die α_{2h}-Kurven. Im Vergleich zu den α_{1h}-Kurven fallen sie bei $\nu = -1$ für die Getriebe A und B nicht mehr zusammen und liegen bei den Getrieben B und C beachtlich günstiger. Bei $\nu = 0$ ist kein und bei $\nu > 0$ ein geringer Unterschied vorhanden.

Die Bilder 51 bis 54 zeigen die Leistungsverhältnisse $|P_h/P_{1+}|_{1max}$, $|P_h/P_{1+}|_{2max}$ sowie min $|P_h/P_{1+}|_{max}$ und geben das Vorzeichen der hydrostatischen Leistung an.

Die Leistungsverhältnisse bleiben konstant oder fallen mit abnehmenden φ. Sie sind kleiner als eins, wenn man von $|P_h/P_{1+}|_{2max}$ für die Getriebe A und B bei $\nu = -1$, d.h. den Kurven b und c im Bild 51 absieht.

Bemerkenswert ist für $\nu = -1$ die Identität von min $|P_h/P_{1+}|_{max}$ und $|P_h/P_{1+}|_{1max}$ für die Getriebe A und B, Kurve a im Bild 51, und für das Getriebe C, Kurve d im Bild 51. Mit Kurve d schneidet hier das Getriebe C am besten ab.

Für das Getriebe C gibt es keine negativen Leistungsflüsse und somit auch keine Blindleistung.

lo. Auslegungsbeispiel für hydrostatisches Koppelgetriebe B

Das Koppelgetriebe soll bei einer Plandrehmaschine mit konstanter Schnittleistung zum Einsatz kommen. Die Daten sind $\nu = -1$; $1/\varphi = o,3$; $T_{2+} = 2oo$ Nm; $i_{12+} = 1$; $\omega_{1max} = \omega_{amax} = 156\ s^{-1}$; $P_{1+} = 31,2$ KW.

Vorzusehen sind nur zwei Verdrängermaschinen, und zwar a und b. Ein Lastanlauf der Arbeitsmaschine bei laufender Kraftmaschine ist nicht erforderlich.

Zur Auslegung dienen die entsprechenden Diagramme im Band II. Das Beispiel ist eingetragen.

Gegenüber einem hydrostatischen Standgetriebe betragen mit $\alpha_2 = o,3$ nach Bild 39 die zu installierenden maximalen Verdrängungsvolumen nur 3o % und mit $|P_h/P_{1+}|_{2max} = o,61$, sig + nach Bild 51 die maximale hydrostatische Leistung nur 61 %.

Man erhält aus Bild 73 $\kappa_{2best} = i_{1qbest} = 2,1$ und aus Bild 78 $\lambda_{a2best} = 1,7$ sowie $\lambda_{b2best} = o,37$. Somit folgen $P_{hmax} = 19$ KW und mit Gl. (29) $|T|_{amax} = 34o$ Nm sowie $|T_b|_{max} = 74$ Nm.

Mit der Beziehung

$$|V|_{max} = \frac{2\pi\ |T|_{max}}{\Delta p} \qquad (432)$$

werden bei Vorgabe eines Differenzdruckes im hydrostatischen Kreislauf $\Delta p = 1oo$ bar die notwendigen maximalen Verdrängungsvolumen $|V_a|_{max} = 214\ cm^3$ und $|V_b|_{max} = 46,5\ cm^3$.

Es ist zu beachten, daß an der Stelle $i_{12+}/i_{12\Delta} = 1/\varphi$ die hydrostatische Leistung ein negatives Vorzeichen hat.

11. Beispiel für hydrostatisches Koppelgetriebe C

Nach Abschnitt 9. eigenen sich Koppelgetriebe C besonders für die Übertragung konstanter Leistung bei relativ hohen Stellverhältnissen $\ddot{y}$. Für die Anwendung können dann z.B. Nutzfahrzeuge in Frage kommen.

Aus wirtschaftlichen Gründen sollen gleich große Verdrängermaschinen verwendet werden. Es sind in einem solchen Fall $\min (P_h/P_{1+})_{max} = (P_h/P_{1+})_{1max}$ und $\kappa_{1best} = \kappa_h$, so daß man nicht nur eine optimale Baugröße, sondern auch optimale Wirkungsgrade erhält.

Das Anfahren der Arbeitsmaschine unter Vollast aus dem Stillstand bei laufender Kraftmaschine soll möglich sein. Somit muß ein Stellbereich mit Drehmomentbegrenzung vorliegen.

Das Getriebe ist für folgende Daten auszulegen und zu gestalten: $\nu = -1$; $1/\ddot{y} = 0{,}143$; $T_{2+} = 720$ Nm; $i_{12+} = 1$; $\omega_{1max} = 220\ s^{-1}$; $P_{1+} = 158$ KW; $\Delta p = 175$ bar.

11.1. Auslegung und Gestaltung

Das gewählte Beispiel hat man in die entsprechenden Diagramme von Band II eingetragen. Nach Bild 92 wird $\kappa_{1best} = \kappa_h = i_{1qbest} = 2{,}64$ und nach Bild 98 bzw. 102 $\lambda_{albest} = \lambda_{b1best} = \lambda_{ah} = \lambda_{b1h} = 1{,}64$.

In Rücksicht auf eine zulässige maximale Gleitgeschwindigkeit von ca. 14 ms^{-1} in den Verdrängermaschinen wählt man $|\omega_a|_{max} = |\omega_b|_{max} = 188\ s^{-1}$.

Es folgen mit Gl. (29) $|T_a|_{max} = |T_b|_{max} = 1390$ Nm und mit Gl. (432) $|V_a|_{max} = |V_b|_{max} = 500\ cm^3$.

Für die Übersetzung i_{1gbest} bietet sich als Zahnräderumlaufgetriebe ein Minusgetriebe mit Hohlrad an. Minusgetriebe haben die Eigenschaft, stets die durchzusetzende Leistung in einen verlustlosen Kupplungsleistungsfluß und in einen Wälzleistungsfluß zu teilen. Sie weisen daher günstige Verzahnungswirkungsgrade auf.

Bild 33 zeigt den konstruktiven Aufbau des Koppelgetriebes. Die wälzgelagerten Verdrängermaschinen haben Axialkolben und schwenkbare Schrägscheiben. Um kompakter zu bauen, verteilte man das Verdrängungsvolumen V_a und V_b jeweils auf zwei gleich große Verdrängermaschinen a_1; a_2 und b_1; b_2 mit je 25o cm^3 bei einem maximalen Schwenkwinkel von $2o^o$.

Die zusammengehörigen Verdrängermaschinen befinden sich übereinander. Innenverzahnte Hülsen verbinden die jeweils fluchtenden Zapfen der Schrägscheiben c. Der Kolben je einer Serveverstelleinrichtung d schwenkt über je einen Hebel h die Schrägscheibenpaare der Verdrängermaschinen a_1, a_2 und b_1, b_2. In der Steuereinrichtung übernimmt ein Doppelkurbeltrieb mit einer Antriebswelle die notwendige Verstellung der Steuerstangen von den beiden Servoverstelleinrichtungen. Die Übertragungsfunktionen des Doppelkurbeltriebes bewirken eine gute Annäherung der vorgeschriebenen Funktion $V_b/V_a = f(1/i_{12})$.

Im Gehäuse befindliche Kanäle leiten die Druckflüssigkeit zwischen den gehäusefesten Steuerspiegeln der einzelnen Verdrängermaschinen. Auch die auf der Antriebswelle m sitzende speisepumpe n fördert über Gehäusekanäle und -bohrungen Druckflüssigkeit in den hydrostatischen Kreislauf.

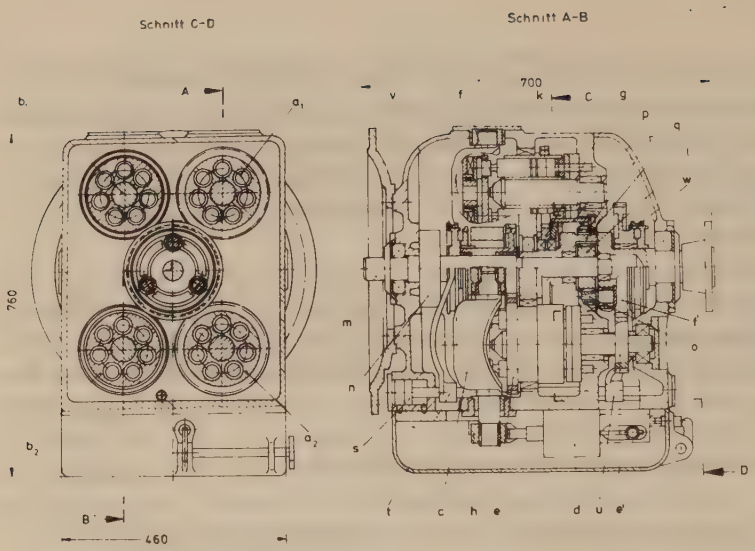

Bild 33 Hydrostatisches Koppelgetriebe C

a_1, a_2, b_1, b_2	Axialkolben-Verdrängermaschinen
c	schwenkbare Schrägscheiben
e,f,e',f', g,k	Zahnräder
h	Hebel
l	Sonnenrad
m	Antriebswelle
n	Speisepumpe
o	Planetenräder
p	Balligzahnkupplung
q	Steg
r	Hohlrad
s	Schaltstangen
t,u	Schaltgabeln
v,w	innenverzahnte Hülsen von Zahnkupplungen

Das Zahnräderumlaufgetriebe bzw. Planetengetriebe besteht aus dem mit der Antriebswelle verbundenem Sonnenrad 1, dem als Abtriebswelle ausgebildetem Steg q mit in ihm wälzgelagerten drei Planetenrädern o und dem Hohlrad r. Eine doppelgelenkige Balligzahnkupplung p schließt das Hohlrad über die Zahnräder g, k an die Verdrängermaschinen a_1, a_2 an und ermöglicht einen selbsttätigen Belastungsausgleich im Planetengetriebe.

Zur Steuereinrichtung gehört ein als Schaltstange gestalteter, hydraulisch beaufschlagter Kolben s, der im Umschaltpunkt über Schaltgabeln t, u und innenverzahnten Hülsen v, w von Zahnkupplungen die Verdrängermaschinen b_1, b_2 mit den Zahnrädern e, f oder e', f' verbindet.

Die notwendige Wärmeabfuhr besorgt ein im Bild 33 nicht dargestellter, im Ölsumpf des Getriebegehäuses liegender Scheibenbündelkühler, der z.B. an den Kühlwasserkreislauf einer Brennkraftmaschine angeschlossen werden kann.

11.2. Vergleiche mit hydrostatischem Standgetriebe

Nach Bild 35 bzw. 43 ist $\alpha_l = \alpha_{lh} = o,42$. Diese Vergleichszahl gilt aber nur, wenn sich auch beim hydrostatischen Standgetriebe die Summe der maximalen Verdrängungsvolumen auf gleich große Verdrängermaschinen aufteilen läßt. Für den vorliegenden Fall ist dies aber nur näherungsweise möglich. Mit $\alpha_l = o,42$ erhält man für das hydrostatische Standgetriebe $|V_a|_{max} + |V_b|_{max} = 1ooo/o,42 = 24oo\ cm^3$. Es folgen mit Gl. (18) $|T_a|_{max} = 843$ Nm, mit Gl. (19) $|T_b|_{max} = 59oo$ Nm ferner mit Gl. (432) $|V_a|_{max} = 3oo\ cm^3$ und $|V_b|_{max} = 21oo\ cm^3$.

Unter Einhaltung gleicher Gleitgeschwindigkeiten, gleicher Differenzdrücke und gleich großer maximaler Verdrängungsvolumen je Verdrängermaschine müssen dann beim Standgetriebe zwei Pumpen und neun Motore mit je $25o\ cm^3$ vorgesehen werden.

Es belaufen sich dann die Summe der maximalen Verdrängungsvolumen auf 2750 cm^3, die praktische Vergleichszahl auf 0,36 und die Abweichung von der theoretischen auf 15 %. Man muß aber beachten, daß nur 2400 cm^3, d.h. 87 % der installierten maximalen Verdrängungsvolumensumme ausgenutzt werden.

Beim Koppelgetriebe C berechnete man den Verlauf des Gesamtwirkungsgrades η mit den in [4] angegebenen Beziehungen aus den Einzelwirkungsgraden der mechanischen Getriebestufen und der Verdrängermaschinen für unterschiedliche Belastungen. Die eingesetzten hydrostatischen Wirkungsgrade stammen aus Angaben des Herstellers nach [3], der Axialkolben-Verdrängermaschinen in etwa gleicher Konstruktion und Größe baut.

Bild 34 zeigt mit den Kurven a den berechneten Verlauf für η abhängig von $1/i_{12}$, und zwar als ausgezogene Kurve für die maximale Leistung, d.h. für ein Antriebsdrehmoment T_1 = 720 Nm und eine Antriebswinkelgeschwindigkeit ω_{1max} = 220 s^{-1} sowie als gestrichelte Kurve für eine Teilantriebsleistung mit T_1 = 540 Nm und ω_1 = 84 s^{-1}. Im Umschaltpunkt $i_{12} = i_{1q}$ = 2,64 haben die Kurven Knicke. Auffallend ist das günstige Teillastverhalten. Die beiden Kurven liegen relativ nahe zusammen.

Im Hause Rheinstahl AG Transporttechnik, Werk Friedrich Wilhelms-Hütte durchgeführte Messungen an einem in der beschriebenen Art ausgeführten Koppelgetriebe bestätigen die Kurven. Die mit Kreisen markierten Versuchswerte gelten für die maximale und die mit Dreiecken gekennzeichneten für die Teil-Leistung. Einzelheiten gibt [1] an.

Zum Vergleich zeigt Bild 34 mit den Kurven b näherungsweise den Verlauf des Gesamtwirkungsgrades η für ein hydrostatisches Standgetriebe, wie oben beschrieben. Die Überlegenheit des Koppelgetriebes C ist beachtlich.

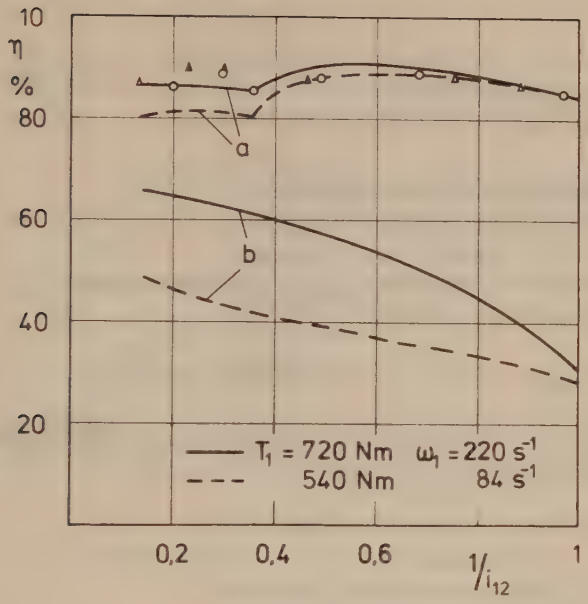

Bild 34 Wirkungsgradverlauf abhängig vom Reziprokwert der Übersetzung

Kurven a Hydrostatisches Koppelgetriebe C

o Versuchswerte für T_1 = 720 Nm, ω_1 = 220 s^{-1}

Δ Versuchswerte für T_1 = 540 Nm, ω_1 = 84 s^{-1}

Kurven b Hydrostatisches Standgetriebe

12. Literatur

1 Jarchow, F.: Stufenlose hydrostatische Umlauf- und Koppelgetriebe
VDI-Berichte Nr. 167, 1971

2 Müller, H.W.: Die Umlaufgetriebe
Springer-Verlag 1971

3 Firmenschrift Mannesmann-Meer, Mönchengladbach
Ölhydraulik Bd I und II

4 VDI-Richtlinie 2152: Hydrostatische Getriebe

5 Jarchow, F., Benthake, H.: Hydrostatische Koppelgetriebe
VDI-Berichte Nr. 228, 1975

Lebenslauf

Persönliches:

Heinrich Benthake,
geb. am 23. Juli 1937 in Düsseldorf

Eltern:
Heinrich Benthake, Berufssoldat,
gefallen 1945, und Ehefrau
Elisabeth, geb. Holmhey

Familienstand:
verheiratet
2 Kinder

Schulbildung:

1943-1945 Volksschule in Eichstätt (Bayern)
1945-1946 Volksschule a.d. Essener Str.
in Düsseldorf
1946-1948 Volksschule a.d. Franklin Str.
in Düsseldorf
1948-1953 Max-Planck-Gymnasium in Düsseldorf
1953-1958 Wittelsbacher Gymnasium
in München
Reifezeugnis vom 12. Juli 1958

Studium:

Maschinenbau
Studienrichtung Allgemeiner Maschinenbau,
an der Technischen Hochschule München
vom Wintersemester 1958/59 bis zum
Wintersemester 1963/64
Diplom-Hauptprüfungszeugnis vom 15. Juli 1964

Berufstätigkeit:

9 Monate prakt. Tätigkeit in allgem.
Maschinenbaubetrieben während der Studienzeit,
Oktober 1963 bis März 1964 Diplomarbeit im
Auftrag des Lehrstuhles Maschinenelemente
und Getriebelehre im Volkswagenwerk Wolfsburg,
April 1964 bis März 1974 Entwicklungs-
und Konstruktionstätigkeit bei

Rheinstahl-Transporttechnik, Werk
Friedrich-Wilhelms-Hütte Mülheim, im
Getriebebau zuletzt als Leiter der
Abteilung Entwicklung, Berechnung, Versuch,

seit April 1974 bei Westdeutsche Getriebe-
werke GmbH, Herne, als Hauptabteilungs-
leiter Entwicklung und Konstruktion

Bamberger Fotodruck
GmbH & Co. KG.
Schadel & Wehle
86 Bamberg · Hohe-Kreuz-Str. 9b · Tel. 0951/21617 [54414]